

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

А.П. Одринский¹⁾, Л.Ф. Макаренко²⁾

¹⁾Институт технической акустики НАН Беларуси,
пр. Людникова 13, Витебск 210009, Беларусь, a.odrinsky@gmail.com

²⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, Makarenko@bsu.by

Облучение полупроводниковых приборов высокоэнергетическими частицами часто используется для модификации их характеристик. Развитие различных экспериментальных методик диагностики дефектного состава в облученных кремниевых структурах, является актуальной задачей полупроводникового материаловедения. Для получения информации о дефектах в облученном кремнии мы впервые использовали изменение с температурой релаксации вентильной фото-эдс. Обнаружено пять дефектов с энергией термоактивации 0.08, 0.16, 0.28, 0.37 и 0.40 eV и эффективным сечением захвата $9.5 \cdot 10^{-20}$, $2 \cdot 10^{-14}$, $5.8 \cdot 10^{-13}$, $5.2 \cdot 10^{-15}$, $1.8 \cdot 10^{-13}$ cm², соответственно. Проведено сравнение с данными нестационарной спектроскопии глубоких уровней.

Ключевые слова: DLTS; кремний; вакансии; радиационные дефекты.

STUDING RADIATION DEFECTS IN FAST ELECTRONS IRRADIATED SILICON

Andrei Odrinsky¹⁾, Leonid Makarenko²⁾

¹⁾Institute of Technical Acoustics NAS Belarus,

13 Ludnikova Ave., 210009 Vitebsk, Belarus, a.odrinsky@gmail.com

²⁾Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, Makarenko@bsu.by

Now the radiating treatment of semi-conductor structures effectively is used for modification them of deep-level defects set. Development of experimental techniques for diagnostics of changes in structure of defects under the radioactive influence on silicon is an actual task of semi-conductor material science. For obtained the information about defects in irradiated silicon we for the first time used change with temperature of a relaxation of photo-emf of barrier. Five defects with activation energies 0.08, 0.16, 0.28, 0.37 и 0.40 eV and effective capture cross-sections $9.5 \cdot 10^{-20}$, $2 \cdot 10^{-14}$, $5.8 \cdot 10^{-13}$, $5.2 \cdot 10^{-15}$, $1.8 \cdot 10^{-13}$ cm² accordingly were observed. Their identification is carried out also.

Keywords: DLTS; silicon; vacancy; radiation defects.

Введение

Известно, что радиационное облучение ведет к повышению удельного сопротивления кремния, и формированию радиационных дефектов. В этих условиях используемые в DLTS-исследованиях барьерные структуры следует рассматривать как «диод Стафеева» [1], где высокое удельное сопротивление объема играет существенную роль в отклике структуры на внешнее воздействие. Встает вопрос разделения эффектов, связанных с объемом кристалла и областью пространственного заряда (ОПЗ) барьерной структуры, и проблемы интерпретации данных

фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (PICTS), варианта DLTS, применяемого в исследовании высокоомных полупроводников. Для получения информации о дефектах в области ОПЗ мы впервые, насколько нам известно, использовали релаксацию вентильной фото-эдс.

Методика эксперимента

Исследовались диодные структуры на основе монокристаллического кремния, облученного быстрыми электронами с энергией 6 МэВ. Флюэнс электронов составлял 2×10^{12} . База диода имела проводимость *n*- типа с концентрацией носите-

лей заряда $\sim 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Размеры образца составляли $5 \times 5 \times 0.4 \text{ mm}$. Для возбуждения использовалось излучение с энергией фотонов $h\nu = 1.08 \text{ eV}$ при $\Delta h\nu = 0.04 \text{ eV}$. Сигнал вентильной эдс регистрировали по падению напряжения на сопротивлении нагрузки 10 Ком . В остальном условия эксперимента не отличались от описанных ранее в работе [1].

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены спектры, полученные с использованием вентильной фото-эдс на радиационно-облученном кремнии.

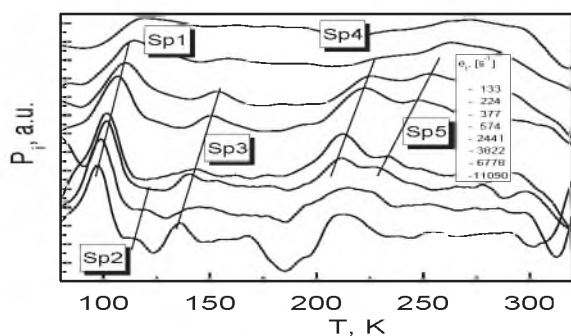


Рис. 1. Набор спектров, соответствующих характеристической скорости эмиссии: 133 s^{-1} , 224 s^{-1} , 377 s^{-1} , 574 ms , 2441 s^{-1} , 3822 s^{-1} , 6778 s^{-1} , 11090 s^{-1} . Спектры нормированы по высоте доминирующего пика и последовательно смещены по оси ординат

Можно наблюдать пики, последовательно изменяющие температурное положение в наборе спектров, что следует интерпретировать как активацию процессов термоэмиссии носителей заряда с дефектов. Можно выделить пять процессов, обозначенных как Sp1-Sp5. В спектрах доминирует интенсивный пик Sp1, расположенный в интервале температуры $\Delta T \sim 97\text{-}119 \text{ K}$. Также можно различить пики меньшей интенсивности в интервалах температуры $\Delta T \sim 136\text{-}163 \text{ K}$, $212\text{-}226 \text{ K}$ а также $248\text{-}264 \text{ K}$, связанные с процессами термоэмиссии носителей зарядов. В интервале $\Delta T \sim 115\text{-}128 \text{ K}$ различим пик Sp2, однако малая интенсивность процесса не позволяет его уверенную идентификацию и Sp2 исключен из дальнейшего анализа.

Высокая интенсивность пика Sp1 свидетельствует о значительной concentra-

ции дефекта, ответственного за данный процесс, и предполагает возможность его существенного влияния на электрические свойства образца. Действительно, в интервале температуры регистрации Sp1 наблюдается уменьшение сигнала вентильной фото-эдс (рис. 2). Если при температуре ниже наблюдения Sp1 релаксация сигнала фактически отсутствует, то с активацией процесса она хорошо заметна, достигая максимума $\sim 18 \text{ mV}$ на высокотемпературном краю регистрации Sp1. При наложении внешнего поля, в режиме «обратно смещенного диода» в диапазоне $T \sim 99\text{-}110 \text{ K}$ наблюдалось изменение знака фотоотклика, что коррелирует с диапазоном регистрации процесса Sp1 и, по-видимому, связано с существенным изменением удельного сопротивления в объеме приборной структуры с изменением зарядового состояния центра Sp1.

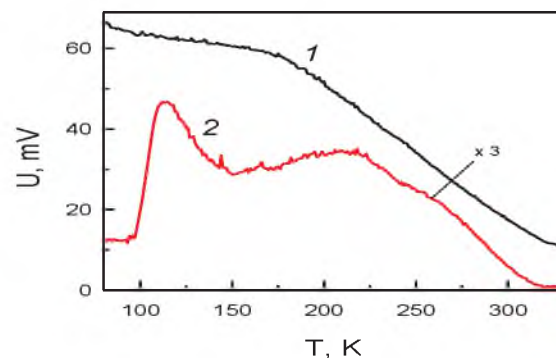


Рис. 2. Зависимость вентильной фото-эдс от температуры – кривая 1. Кривая 2 – напряжение на образце в начальный момент регистрации релаксации сигнала

На рис. 3 температурная зависимость скорости термоэмиссии Sp1 сопоставлена данным литературы. Положение графика для Sp1 близко к наблюдавшейся ранее термоэмиссии с донора, известного как центр A [2, 3]. Рассчитанные методом МНК параметры центра - E_a и σ_t также хорошо сопоставимы с данными [2, 3]. Тем не менее, в нашем случае на графике Аррениуса Sp1 присутствует излом, что может свидетельствовать о более сложном характере процесса в сопоставлении с простой моделью – «single trap».

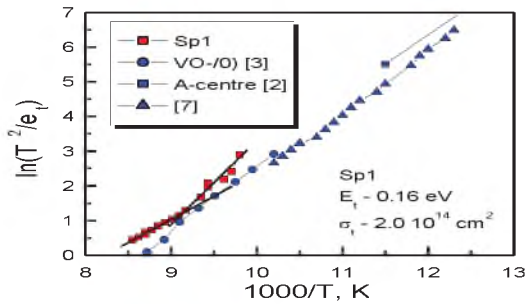


Рис. 3. Сравнение графика Аррениуса процесса Sp1 с данными литературы

На рис. 4 представлено сопоставление температурных зависимостей скорости термоэмиссии процессов Sp3- Sp5 с данными литературы. По близкому положению графика Аррениуса процессы Sp3 и Sp5 были сопоставлены дефектами V2(--/-) [5] и V3(--/-) [6], а Sp4 - дефекту C_iO_i(0/+) [3].

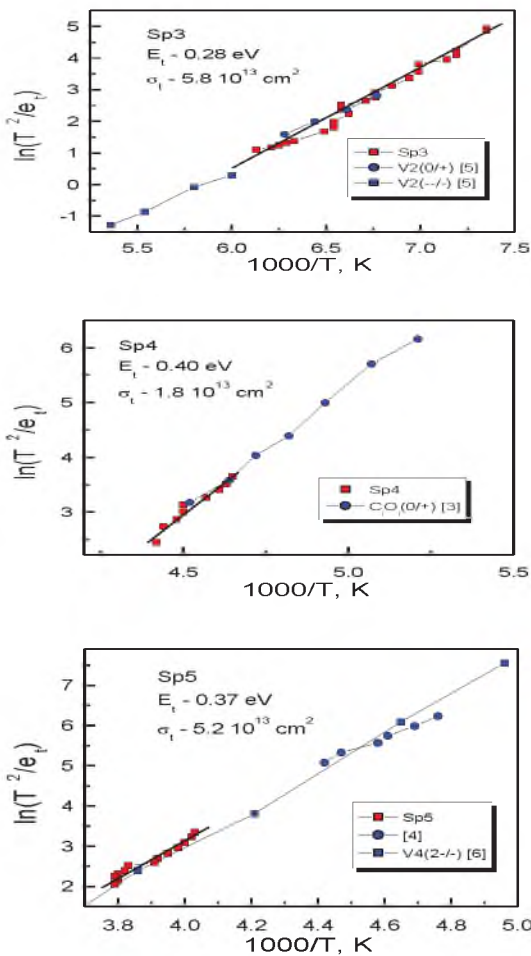


Рис. 4. Сравнение графика Аррениуса процесса Sp3- Sp5 с данными литературы

Заключение

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют возможности новой методики, основанной на отслеживании изменения с температурой релаксации сигнала вентиляционной фото-эдс, в изучении радиационных дефектов в кремнии. В облученном кремнии обнаружено пять процессов термоактивации локализованного заряда, идентифицированных с ранее наблюдавшимися радиационными дефектами, а именно комплекс вакансии - междоузельный кислород, комплекса междоузельного кислорода и углерода и кластеров вакансий.

Библиографические ссылки

1. Стафеев В.И. Влияние сопротивления толщи полупроводника на вид вольтамперной характеристики диода. *Журнал технической физики* 1958; 28(8): 1631-1641.
2. Одринский А.П., Казюциц Н.М., Макаренко Л.Ф. PICTS-спектроскопия синтетического НРНТ алмаза в области температур 300 – 550 К. *Известия Нац. академии наук Беларуси. Серия физ.-мат. наук* 2014; (4): 102-107.
3. Brotherton S. D., Bradley P. Defect production and lifetime control in electron and γ -irradiated silicon. *Journal of Applied Physics* 1982; 53(8): 5720-5732.
4. Kaminski P., Kozlowski R., Nossarzewska-Orlowska E. Formation of electrically active defects in neutron irradiated silicon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 2002; 186: 152-156.
5. Kaminski P., Kozlowski R., Jelenski A., Mchedlidze T. and Suezawa M. High-Resolution Photoinduced Transient Spectroscopy of Electrically Active Iron-Related Defects in Electron Irradiated High-Resistivity Silicon. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2003; 42(9): 5415-5419.
6. Kaminski P., Kozlowski R., Pawlowski M. High-Resolution Photoinduced Transient Spectroscopy - A Powerful Tool for characterization of Radiation Defects in Silicon. «1st RD50 Workshop Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity collider (CERN, October 2- 4, 2002).
7. Kaminski P., Jelenski A., Kozlowski R., Hindrichsen C., Jensen L. Investigation of Energy Levels of Small Vacancy Clusters in Proton Irradiated Silicon by Laplace Photoinduced Transient Spectroscopy. *Crystals* 2022; 12(12): 1703(19pp.).
8. Evans-Freeman J.H., Kan P.Y.Y., Abdelgader N. High resolution deep level transient spectroscopy studies of the vacancy-oxygen and related defects in ion-implanted silicon. *J. Appl. Phys.* 2002; 92: 3755-3760.