

4. Murin, L.I. Evolution of radiation-induced carbon-oxygen-related defects in silicon upon annealing: LVM studies / L.I. Murin, J.L. Lindström, G. Davies, V.P. Markevich // Nucl. Instr. and Meth. B. 2006. Vol. 253. P. 210.
5. Londos, C.A. Isochronal annealing studies of carbon-related defects in irradiated Si / C.A. Londos, M.S. Potsidi, G.D. Antonaras, A. Andrianakis // Physica B. 2006. Vols. 376-377. P. 165.
6. Potsidi, M.S. The $C_iC_s(I_{Si})$ defect in silicon: An infrared spectroscopy study / M.S. Potsidi, C.A. Londos // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100, N3. P. 033523.
7. Lavrov, E.V. Local vibrational modes of the metastable dicarbon center (C_s-C_i) in silicon / E.V. Lavrov, L. Hoffmann, B. Bech Nielsen// Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60, N11. P. 8081.

ОСОБЕННОСТИ ПАРАМАГНЕТИЗМА ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЖЕЛЕЗА, НИКЕЛЯ И СУРЬМЫ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПРОМЫШЛЕННОГО ФОТОРЕЗИСТА

**В. Б. Оджаев¹, А. Н. Олешкевич¹, Т. М. Лапчук¹, Н. М. Лапчук¹,
В. С. Волобуев², А. Н. Никитенко²**

¹*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, lapchuk@bsu.by*

²*Белорусский государственный технологический университет*

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие наблюдается повышенный интерес к ионно-лучевым методам формированияnanoструктурированных металлогорганических систем путем имплантации ионов металлов с высокими дозами в полимерную матрицу [1, 2]. Перспективность использования метода ионной имплантации для синтеза металлополимерных нанокомпозитных материалов определяется тем, что этот способ универсален – он может быть использован для формирования nanoструктурированных композиций практически любого металла в полимерной подложке. Потенциальная возможность выбора полимерной матрицы для ионного облучения позволяет в перспективе получать металлополимерные композиты не только с желаемыми парамагнитными свойствами, но и с необходимыми для практики физико-механическими и электрическими параметрами.

Целью работы было установление основных отличительных черт радиационного легирования пленок фоторезиста примесью, с различной магнитной активностью путем анализа основных параметров спектров ЭПР образцов пленок фоторезиста, имплантированных ионами металлической магнитной (Fe, Ni) и немагнитной (Sb) примеси.

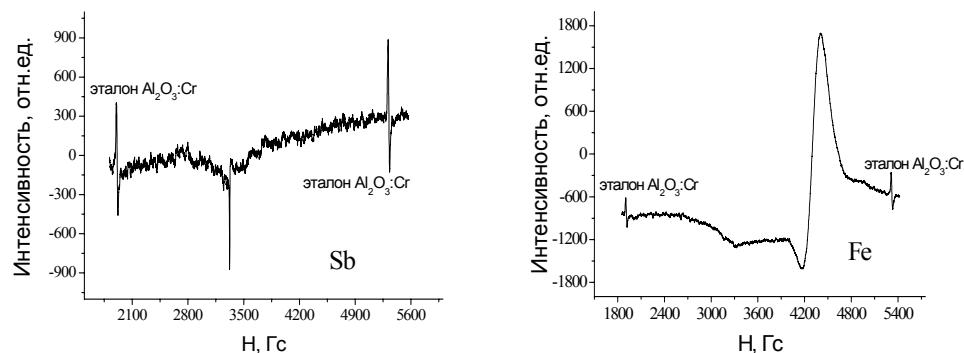
МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследования были образцы пленок промышленного позитивного фоторезиста марки ФП 9120 исходные и имплантированные ионами металлической примеси (Fe, Ni, Sb). Пленка фоторезиста толщиной 1,8 мкм наносилась на поверхность пластин кремния марки КДБ-10 (111). Имплантация ионов сурьмы в пленки осуществлялась в режиме с энергией 60 кэВ в интервале доз $1\times 10^{15} - 5\times 10^{16}$ см⁻², ионов железа и никеля с энергией 40 кэВ в интервале доз $2,5\times 10^{16} - 1,5\times 10^{17}$ см⁻² (Fe⁺) и $1\times 10^{16} - 1,5\times 10^{17}$ см⁻² (Ni⁺) при плотности тока 4 мкА/см² на ионно-лучевом ускорителе «Везувий-6» в остаточном вакууме 10^{-5} мм.рт.ст. Выбор имплантируемых ионов металла определялся разницей по атомной массе и величине магнитной восприимчи-

вости, а энергии имплантации – величиной пробега ионов, которая соответствовала приповерхностной модификации пленки на глубины до 100 нм. Регистрация спектров ЭПР осуществлялась на спектрометре “RadioPAN SEX-2543” в X – диапазоне при включенной автоподстройке частоты генератора СВЧ (клистрона) по частоте резонатора H_{102} . Поляризующее магнитное поле модулировалось с частотой 100 кГц; амплитуда модуляции магнитного поля 0,1 мТл, чувствительность спектрометра – 3×10^{12} спин/мТл.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В спектрах ЭПР исходных образцов пленок фоторезиста и имплантированных ионами никеля не регистрировались линии поглощения, обусловленные свободными радикалами и радиационным нарушением структуры пленок, во всем интервале используемых доз имплантации. Для пленок фоторезиста, имплантированных ионами сурьмы с дозой 1×10^{15} см $^{-2}$ и ионами железа с дозой 2×10^{16} см $^{-2}$, сигналы ЭПР также не наблюдались. На рисунке 1 приведены спектры ЭПР образцов пленок фоторезиста, имплантированных ионами сурьмы ($E = 60$ кэВ) и ионами железа ($E = 40$ кэВ) при одинаковой дозе 5×10^{16} см $^{-2}$.

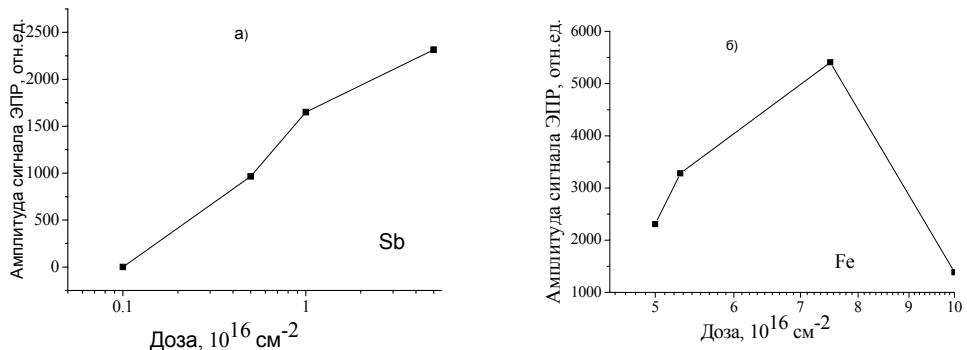


Rus. 1. Спектры ЭПР образцов пленок фоторезиста, имплантированных ионами сурьмы (Sb) ($E = 60$ кэВ) и железа (Fe) ($E = 40$ кэВ) при одинаковой дозе 5×10^{16} см $^{-2}$

Как видно из рисунка 2а амплитуда сигнала ЭПР при имплантации ионов сурьмы в пленки фоторезиста возросла в 2,5 раза по сравнению с первоначально зарегистрированным сигналом ЭПР при дозе 5×10^{15} см $^{-2}$, при этом ширина линии уменьшилась с 3,4 до 2.2 Гс. Природа парамагнитных центров в исследуемых пленках фоторезиста обусловлена локализованными на разорванной химической связи С-С неспаренными электронами [3,4], кинетика накопления которых в процессе имплантации ионов сурьмы практически линейная для выбранного диапазона доз ионов.

При имплантации ионов железа (рис. 2б) переломный момент в процессе радиационного структурирования полимерной пленки фоторезиста наступает при дозе $7,5 \times 10^{16}$ см $^{-2}$, при которой в спектрах ЭПР наблюдается сигнал с максимальной амплитудой, с минимальным значением ширины линии (229,9 Гс), обусловленной ионами железа и минимальным для этого центра значением g-фактора (1,0338). Дальнейшее увеличение дозы имплантации (1×10^{17} см $^{-2}$) приводит к сильному уширению сигнала и уменьшению его интенсивности. Природа парамагнитных центров в исследуемых пленках фоторезиста, облученных ионами железа, обусловлена обмен-

ным взаимодействием между атомами накапливаемой в имплантированном слое фоторезиста примеси железа [5].



Rис. 2. Зависимость амплитуды сигнала ЭПР от дозы имплантированных ионов сурьмы ($E = 60$ кэВ) (а) и железа ($E = 40$ кэВ) (б) в пленки фоторезиста

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены отличительные особенности парамагнитных свойств имплантированных ионами металлов сурьмы, железа и никеля пленок фоторезиста, которые объясняются природой самих ионов. Природа парамагнитных центров в имплантированных ионами сурьмы пленках фоторезиста обусловлена локализованными на разорванной химической связи С-С неспаренными электронами. Среди металлов V группы Периодической системы элементов только у Bi и Sb самая большая по абсолютной величине диамагнитная восприимчивость ($1,35 \times 10^{-6}$ и $0,66 \times 10^{-6}$, соответственно). Это объясняется тем, что только незначительная часть валентных электронов участвует в проводимости. Уменьшение ширины линии сигнала ЭПР при росте его амплитуды в имплантированных ионами сурьмы пленках фоторезиста может быть объяснено возможным диазотированием пленок в процессе увеличения дозы имплантированных ионов сурьмы, а также удалением влаги из полимера с образованием сшивок между молекулами полимера. У переходных металлов магнитные свойства определяются в первую очередь, магнитными моментами не полностью заполненных d- и f-оболочек. Известно, что ферромагнетиками являются некоторые 3d-металлы, а именно Fe, Co, Ni. Для этих металлов волновые функции заметно перекрываются, что приводит к существенной коллективизации этих электронов и проявлению ферромагнетизма. Значения g-факторов свидетельствуют о преимущественном вкладе орбитального момента электронов, чем объясняется магнетизм легированных ионами железа пленок фоторезиста не магнитных в исходном состоянии. Отсутствие сигналов ЭПР в имплантированных ионами никеля пленках фоторезиста даже при высоких дозах имплантации возможно связано с тем, что никель, в отличие от железа и кобальта, не является карбидообразующей примесью, но может образовывать Ni-N центры, наблюдаемые при низких температурах [3].

ЛИТЕРАТУРА

- Popok V.N. Ion implantation of polymers: Formation of nanoparticulate materials / V.N. Popok // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2012. – Vol. 30, No 1. – P. 1-26.
- Оджаев, В.Б. Ионная имплантация полимеров / В.Б. Оджаев, и др. //БГУ, 1998. - 197 с.

3. Pehrsson P.E. Chemical and physical interactions in covalent polymers implanted with transition metals /P.E.Pehrsson, D.C.Weber, N.C.Koon et.al. //Mat.Res.Symp.Proc. 1984. - V.27. - P.429-434.
4. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. Москва: Химия, 2000. 672 с
5. Stepanov A.L. Reflectance of the dielectric layers containing metal nanoparticles formed by ion implantation / A.L. Stepanov, D.E. Hole, P.D. Townsend // Journal of Non-Crystalline Solids. Volume 244, Issues 2-3, 2 March 1999, P. 275-279

ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИИ ФОТОТОКА СИНТЕТИЧЕСКОГО НРНТ АЛМАЗА В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР 420 – 540 К

А. П. Одринский¹, Н. М. Казючиц², Л. Ф. Макаренко²

¹*Институт технической акустики НАН Беларуси,*

²*Белорусский государственный университет*

Синтетический алмаз перспективен для расширения ассортимента детекторов ультрафиолетового, радиационного излучения, потоков заряженных частиц и т.д., обладающих длительной работоспособностью в ускорителях элементарных частиц, открытом космосе, радиационной терапии. Однако электрически активные дефекты алмаза мало изучены. Мы исследовали электрически активные дефекты алмаза на базе фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (PICTS [1])

Монокристалл синтетического алмаза, выращен РУП «Адамас БГУ» [2] методом НРНТ. Плоскопараллельная пластина толщиной ~ 300 мкм вырезана из центральной части кристалла вдоль плоскости (100). После полировки на поверхности образца имплантацией ионов бора с активационным отжигом формировалась система контактов - встречно-штыревых пар (площадь отдельной пары - 1,0×0,8 мм²) и сплошного тылового.

Образец возбуждали прямым излучением ксеноновой лампы ДКСШ-500. Условия и методика регистрации данных подробно описаны в [3].

При исследовании различных участков образца в PICTS спектрах в области температур $\Delta T = 420\text{--}540$ К наблюдался интенсивный пик. Форма пика имела асимметричное уширение, возрастающее с уменьшением характеристического времени спектра, что предполагает наличие в регистрируемом сигнале вклада перезарядки нескольких дефектов. Для разделения вкладов отдельных процессов в кинетику релаксации мы применили аппроксимацию зарегистрированного сигнала суммой экспоненциальных составляющих:

$$Y(t) = A \exp(-\alpha t) + B \exp(-\beta t) + C \quad (1).$$

Использовали специальную программу итерационного определения параметров модели методом согласованного градиентного спуска. Процедура проводилась последовательно, в каждой точке области температур ΔT - наблюдения пика в PICTS-спектрах. На рис. 1 представлены результаты аппроксимации по данным, полученным на центральном участке образца. Показатели степени экспоненциальных составляющих демонстрируют устойчивый рост с температурой, за исключением области 420-440 К, где β практически не изменяется. В области $T > 460$ К зависимости $\alpha(T)$ и $\beta(T)$ типичны для термоэмиссии с ловушек.