

Рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с УВЗ в режиме радиоимпульсного сигнала вида

$$S(f) = \frac{U \cdot \tau_u}{2} \cdot \frac{\sin \frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}} + \frac{\sin \frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}},$$

где $\frac{U \cdot \tau_u}{2} = 1$ – амплитуда;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – частота;

ω_0 – несущая частота;

τ_u – длительность радиоимпульса.

Среда распространения обладает параметрами $\varepsilon_0, \mu_0, \sigma_0$, волна падает на безграничную поверхность с анизотропным импедансом. Процесс взаимодействия ЭМВ, возбуждаемой с помощью переносного передатчика, перемещаемого вдоль исследуемого профиля с локальным включением на трассе распространения радиоволн, можно представить в виде наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией. Методика исследований заключается в определении поверхностного импеданса среды над УВЗ по формулам

$$\begin{aligned} \dot{E}_x &= -Z_0(\dot{Z}_{11}\dot{H}_x - \dot{Z}_{12}\dot{H}_y), \\ \dot{E}_y &= -Z_0(\dot{Z}_{21}\dot{H}_x - \dot{Z}_{22}\dot{H}_y), \\ \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\varepsilon}_R\dot{\varepsilon}_L}}(\sqrt{\dot{\varepsilon}_R} - \sqrt{\dot{\varepsilon}_L}), \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\dot{\varepsilon}_R\dot{\varepsilon}_L}}(\sqrt{\dot{\varepsilon}_R} + \sqrt{\dot{\varepsilon}_L}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $E_{x,y}, H_{x,y}$ – проекции падающей и отраженной волн на соответствующие координатные оси;

Z_0 – характеристическое сопротивление среды, окружающей анизотропную неоднородность;

$\dot{Z}_{11}$ и $\dot{Z}_{12}$ – компоненты поверхностного импеданса среды;

$\dot{\varepsilon}_R = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 = \text{Re } \varepsilon_R + j \text{Im } \varepsilon_R$;

$\dot{\varepsilon}_L = \dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2 = \text{Re } \varepsilon_L + j \text{Im } \varepsilon_L$.

(2)

В выражениях (2) присутствуют элементы матрицы (3):

$$\dot{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_1 & -j\dot{\varepsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\varepsilon}_2 & \dot{\varepsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}_3 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Определение величин поверхностного импеданса для различных режимов облучения исследуемого профиля ЭМВ позволяет выделить границу УВЗ. Переход от изотропной среды к анизотропной сопровождается изменением свойств земной поверхности, что приводит к соответствующим изменениям компонентов поверхностного импеданса.

Компоненты поверхностного импеданса среды над УВЗ в выражениях (2) представим в виде

$$\dot{Z}_{11} = |\dot{Z}_{11}| \cdot \exp(j \cdot \phi_{z11}), \dot{Z}_{12} = |\dot{Z}_{12}| \cdot \exp(j \cdot \phi_{z12}), \quad (4)$$

где $|\dot{Z}_{11}|, |\dot{Z}_{12}|, \phi_{z11}, \phi_{z12}$ – соответственно модули и фазы составляющих поверхностного импеданса.

Результаты исследований. Проведен анализ выражений (4) для компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [1]: удельная электрическая проводимость $\sigma_r = (10^{-6} - 1)$ См/м; концентрация частиц $N_e = N_i = 10^{15} \text{ м}^{-3}$; частота столкновения частиц $\nu = 10 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад / с. Количество гармоник спектра радиоимпульсного сигнала n выбрано равным 5. Диэлектрическая проницаемость среды исследовалась

в диапазоне от 1 до 25. Величина поверхностного импеданса среды над углеводородами определяется физико-химическими процессами в самой залежи и в околозалежном пространстве, составом кристаллического скелета и термодинамическими условиями залегания (давление и температура), приводящим к влиянию углеводородов на электрические свойства вмещающих пород над УВЗ. Абсолютные значения для компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ приведены на рисунках 1, 2.

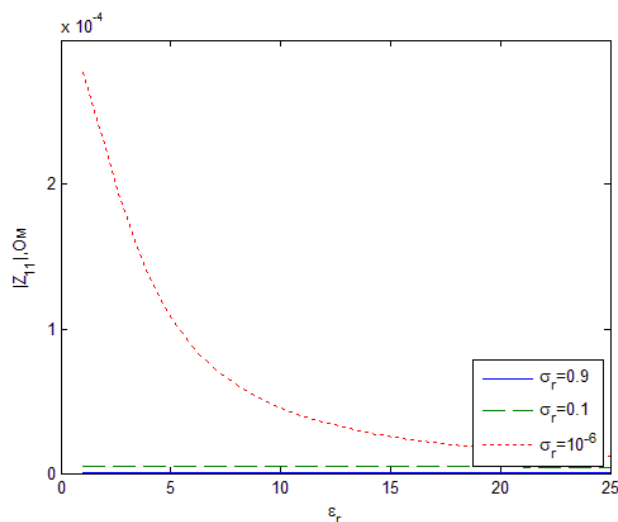


Рисунок 1. – Зависимости $|Z_{11}| = \psi(\epsilon_r)$ при изменении удельной проводимости среды

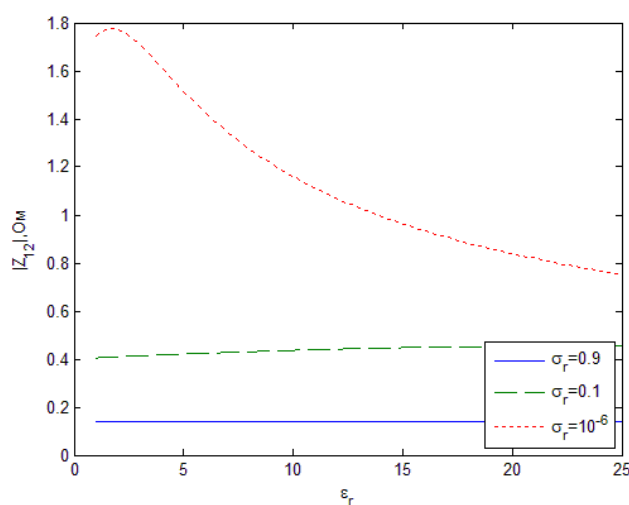


Рисунок 2. – Зависимости $|Z_{12}| = \psi(\epsilon_r)$ при изменении удельной проводимости среды

Следует учесть, что величины $|Z_{11}|$ и $|Z_{12}|$ являются нормированными и для определения полных величин импеданса их нужно домножать на величину сопротивления окружающей среды $Z_0 = 377$ Ом. Составляющая $|Z_{11}|$ постоянна при больших значениях удельной проводимости среды, лежащих в диапазоне $\sigma_r = (0,1 - 0,9)$ См/м и при этом не зависит от вариации диэлектрической проницаемости пород. При уменьшении удельной проводимости среды до 10^{-6} См/м закономерности поведения комбинационных составляющих поверхностного импеданса среды над УВЗ могут быть рекомендованы для диагностики анизотропных сред, поскольку происходит резкое изменение данной фазовой компоненты, особенно при значениях диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = (1 - 10)$. Дополнительно информацию при таких исследованиях дает анализ характеристик компоненты поверхностного импеданса $|Z_{12}|$. Прослеживается аналогичная функциональная зависимость данной составляющей как и для $|Z_{11}|$ за исключением численных значений. Влияние удельной проводимости среды проявляется более ощутимо и это приводит

к повышению информативности исследований. Дополнительно были проанализированы фазовые составляющие поверхностного импеданса среды над залежью (рисунок 3, 4).

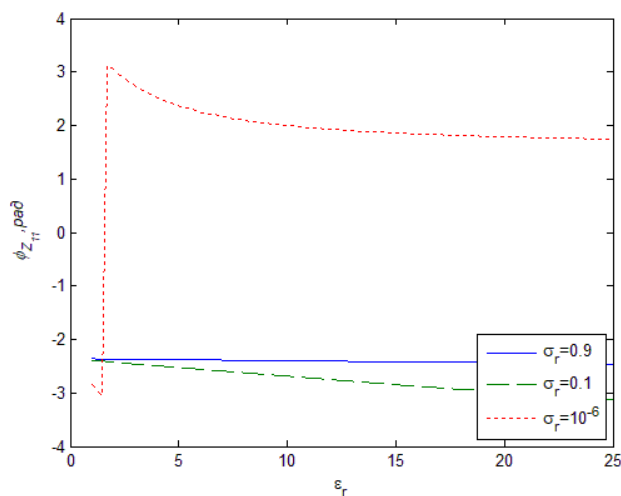


Рисунок 3. – Зависимости $\phi_{z_{11}} = \psi(\epsilon_r)$ при изменении удельной проводимости среды

Составляющая $\phi_{z_{11}}$ постоянна при больших значениях удельной проводимости среды, например для $\sigma_r = 0,9$ См/м и при этом не зависит от изменения диэлектрической проницаемости исследуемых профилей местности. При уменьшении удельной проводимости среды до 0,1 См/м наблюдается уменьшение данной комбинационной составляющей поверхностного импеданса среды над УВЗ при росте диэлектрической проницаемости среды ϵ_r . Выделяется экстремальное поведение составляющей $\phi_{z_{11}}$ для $\sigma_r = 10^{-6}$ См/м, когда происходит скачкообразное увеличение фазы от -3 рад до 3 рад для диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 2$. Следует отметить, что составляющая $\phi_{z_{11}}$ носит отрицательный характер, за исключением $\sigma_r = 10^{-6}$ См/м, когда появляется положительный характер поведения данной величины, что соответствует изменению характера проводимости среды. Составляющая $\phi_{z_{12}}$ также постоянна при больших значениях удельной проводимости среды, например для $\sigma_r = 0,9$ См/м. Уменьшение удельной проводимости среды приводит к вариации данной фазовой составляющей поверхностного импеданса среды над УВЗ в зависимости от изменения диэлектрической проницаемости исследуемых профилей местности. При уменьшении удельной проводимости среды до 10^{-6} См/м наблюдается наиболее контрастное уменьшение данной комбинационной составляющей поверхностного импеданса среды над УВЗ при росте диэлектрической проницаемости среды ϵ_r . В отличие от фазовой составляющей $\phi_{z_{11}}$ данная компонента всегда положительна в исследуемом диапазоне удельной проводимости среды.

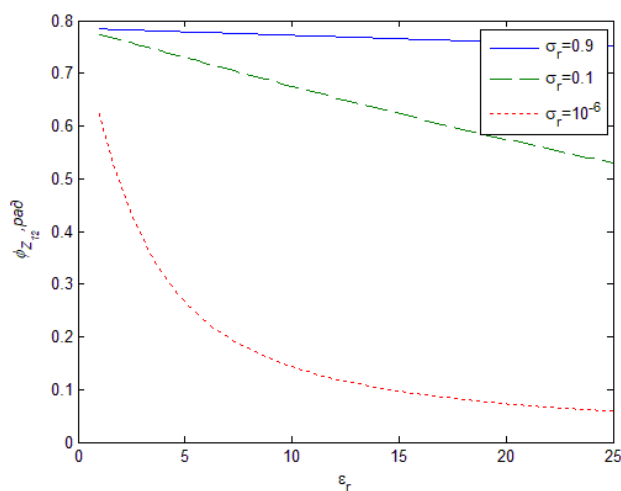


Рисунок 4. – Зависимости $\phi_{z_{12}} = \psi(\epsilon_r)$ при изменении удельной проводимости среды

Следует отметить, что зависимости, представленные на рисунках 1–4, соответствуют частоте импульса $F_u = \frac{1}{\tau_u} = 10^6$ Гц. Было проанализировано ее влияние на компоненты поверхностного импеданса среды над УВЗ (рисунок 5, 6). Применяя частоту импульса 10^7 Гц, установлено ее воздействие на составляющие сопротивления подстилающей поверхности. При высоких значениях удельной проводимости среды ($\sigma_r = 0,9$ См/м) абсолютная величина составляющей $|Z_{11}|$ практически равна нулю во всем исследуемом диапазоне диэлектрической проницаемости. Поверхностный импеданс среды над УВЗ в таком режиме соответствует идеальному проводнику. Для $\sigma_r = 0,1$ См/м в отличие от предыдущей частоты импульса появляется увеличение данной компоненты в диапазоне $\epsilon_r = (1-10)$. Наиболее контрастное изменение (уменьшение) происходит для $\epsilon_r = (1-5)$. Абсолютная величина составляющей $|Z_{12}|$ значительно превышает по величине $|Z_{11}|$. Для данной компоненты характерно увеличение импеданса по сравнению с предыдущим режимом. При высоких значениях удельной проводимости среды ($\sigma_r = 0,9$ См/м) абсолютная величина составляющей $|Z_{12}|$ практически постоянна при вариации диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности. Для $\sigma_r = 0,1$ См/м в отличие от предыдущей частоты импульса появляется увеличение данной компоненты в диапазоне $\epsilon_r = (1-10)$. Низкие значения удельной проводимости среды ($\sigma_r = 10^{-6}$ См/м) приводят к более контрастным изменениям величины $|Z_{12}|$. В диапазоне $\epsilon_r = (1-10)$ происходит уменьшение данной составляющей поверхностного импеданса среды над УВЗ примерно в 3–3,5 раза. Фазовые составляющие поверхностного импеданса несут дополнительную информацию о характере сопротивления.

В результате процедуру диагностики среды можно осуществлять согласно методики решения обратной задачи, по которой на основании измерения компонент поверхностного импеданса и его фазовых компонент осуществляется определение диэлектрической проницаемости, удельной проводимости среды и глубины слоя. При определении поверхностного импеданса важную роль играют физико-геологические свойства пород-коллекторов, которые в свою очередь определяются гранулометрическим и минералогическим составом пород, особенностями структурно-текстурного строения скелета. Двухканальная схема определения комбинационных составляющих $|Z_{11}|$ и $|Z_{12}|$ позволяет учитывать характер пористости и проницаемости, вид цементирующего вещества и механические свойства скелета, количеством пластовой воды в порах и ее минерализацию и т.д. Распространение ЭМВ в режимах с правой и левой круговыми поляризациями над исследуемым геологическим профилем местности позволяет повысить производительность методов электроразведки. Дополнительная априорная информация может быть получена с помощью перемещения передатчика и приемника вдоль исследуемого профиля, задаваясь конкретными значениями расстояний и проводя конкретизацию электродинамических моделей УВЗ для повышения эффективности ЭММ георазведки с учетом влажности слоев, климатических факторов и особенностей измерений сезонного характера.

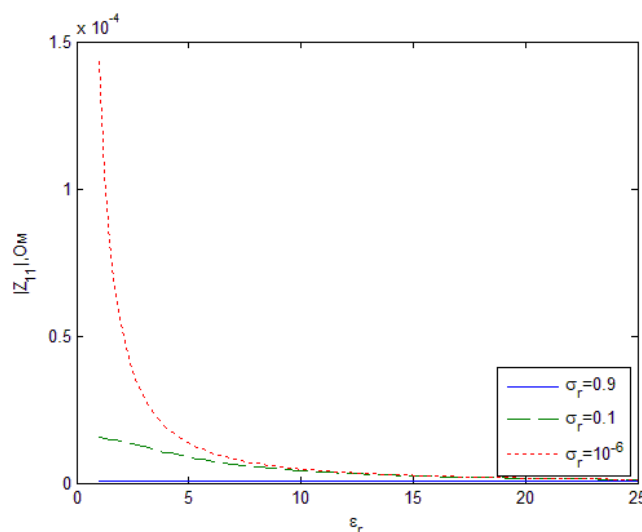


Рисунок 5. – Зависимости $|Z_{11}| = \psi(\epsilon_r)$ при изменении удельной проводимости среды

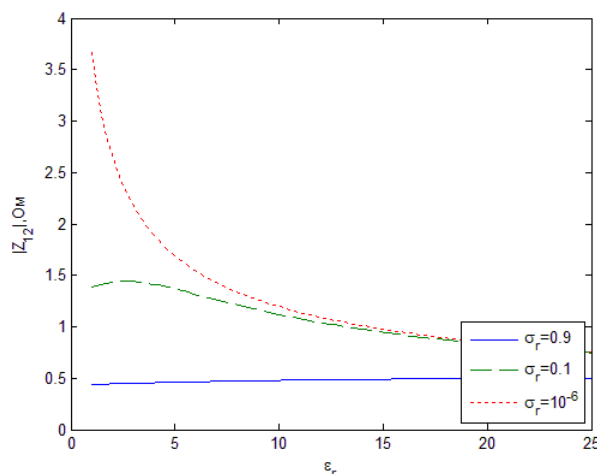


Рисунок 6. – Зависимости $|Z_{12}| = \psi(\epsilon_r)$ при изменении удельной проводимости среды

Заключение. Проведенный анализ компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ при взаимодействии радиоимпульсных сигналов показал возможность расширения функциональных зависимостей данных компонентов от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

При этом следует отметить:

- электродинамические характеристики среды над залежью углеводородов в режиме радиоимпульсных сигналов могут быть определены по характеру и величине амплитудных и фазовых компонент поверхностного импеданса анизотропного слоя;
- информативность методов оконтуривания и выделения УВЗ повышается за счет применения для определения характеристик среды над залежью ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями, что реализуется на основе двухканальной схемы определения комбинационных составляющих;
- по амплитудным и фазовым характеристикам поверхностного импеданса при вариации частоты радиоимпульса может осуществляться диагностика сред при повышении производительности геологоразведочных работ и точности определения границ залежей углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
2. Электроразведка : справ. геофизика : в 2 кн. – 2-е изд., перераб. и доп. ; под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. – М. : Недра, 1989. – Кн. 1. – 438 с.
3. Электроразведка : справ. геофизика : в 2 кн. – 2-е изд., перераб. и доп. ; под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. – М. : Недра, 1989. – Кн. 2. – 378 с.
4. Способ поиска месторождений нефти и газа : а. с. SU 1264122 / А.Ф. Семенцов, В.Ф. Семенцов. – Оpubл. 15.10.1986.
5. Могилатов, В.С. Зондирования вертикальными токами / В.С. Могилатов, Б.П. Балашов. – Новосибирск : СО РАН, филиал «Гео», 2005.
6. Moskvichew, V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9-th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
7. Способ радиоволнового зондирования и устройство для его осуществления : пат. RU 2152060 / В.К. Томилин, Г.П. Астафьев, В.И. Луконин. – Оpubл. 27.06.2000.
8. Levashov, S.P. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations [Electronic resource] / S.P. Levashov // 66nd EAGE Conf. and Tech. Exhib., Paris, France, 7–10 June 2003. – CD-ROM Abstracts volume.
9. Adamovskiy, E. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits / E. Adamovskiy, V. Yanushkevich // 8 Junior researchers conference European and national dimension in research : in 3 p. / PSU. – Novopolotsk : PSU, 2016. – P. 3 : Technology. – P. 179–183.
10. Frasheri, A. Self-potential anomalies as possible indicators in search for oil and gas reservoirs / A. Frasheri // 57th EAGE Conf. and Tech. Exhib., Glasgow, 29 May–2 June 1995. – Glasgow, UK. – P. 8.

11. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов. / В.Ф. Янушкевич [и др.]. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – Новополоцк, 2016. – № 12. – С. 45–50.
12. Иванова, К.И. Способ геоэлектроразведки углеводородной залежи с использованием радиоимпульсных сигналов. / К.И. Иванова, В.Ф. Янушкевич // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире : материалы XV междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 4 окт. 2016 г. – СПб. – Т. 1. – С. 107–111.
13. Янушкевич, В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
14. Янушкевич, В.Ф. Моделирование двухчастотного взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Ф. Янушкевич // Приборы. Справ. журн. – 1999. – № 10. – С. 27–29.
15. Электродинамические параметры подводных источников в поле поверхностной электромагнитной волны / Д.В. Гололобов [и др.]. // 35 Всерос. Межвуз. науч.-техн. конф. : тез. докл. – Владивосток. – 1992. – Т. 1, ч. 1. – С. 59–62.
16. Янушкевич, В.Ф. Поверхностный импеданс анизотропной среды над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов [Электронный ресурс] / В. Ф. Янушкевич // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 10. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/2/text.pdf>. – Дата доступа: 25.02.2020.

Поступила 10.03.2020

INFLUENCE OF LAYOUT SURFACE CHARACTERISTICS ON COMPONENTS OF SURFACE IMPEDANCE OF THE MEDIUM OVER HYDROCARBONS

S. ABRAMENKO, V. YANUSHKEVICH, V. BOGUSH

The article provides an analysis of the interaction of electromagnetic waves in the mode of radio-pulse signals with the medium above hydrocarbon deposits. The behavior of the amplitude and phase components of the surface impedance of the anisotropic medium over the reservoir in the mode of radio-pulse signals based on the quasi-hydrodynamic approach is studied. The analysis of the constituent components of the surface impedance of the medium over hydrocarbons for electromagnetic waves with right and left circular polarizations, depending on the dielectric constant and conductivity of the medium. It has been established that, according to the amplitude and phase characteristics of the surface impedance, when the frequency of the radio pulse is varied, media diagnostics can be carried out while increasing the productivity of exploration work and the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits.

Keywords: hydrocarbon deposit, surface impedance, radio-pulse signal.

УДК 544.58: 661.12

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛЕНКАХ ДИАЗОХИНОН-НОВОЛАЧНОГО РЕЗИСТА НА КРЕМНИИ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Ag^+ **канд. физ.-мат. наук, доц. С.А. ВАБИЩЕВИЧ, Н.В. ВАБИЩЕВИЧ****(Полоцкий государственный университет);****Г.А. ЭСПИНОЗА де лос МОНТЕРО, канд. физ.-мат. наук Д.И. БРИНКЕВИЧ,****канд. физ.-мат. наук, доц. В.С. ПРОСОЛОВИЧ****(Белорусский государственный университет, Минск)**

Методом ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) исследованы пленки диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,8 мкм, имплантированные ионами серебра с энергией 30 кэВ дозами $2,5 \cdot 10^{16}$ – $1 \cdot 10^{17}$ см⁻². Показано, что в процессе имплантации ионами Ag^+ структур фоторезист – кремний происходит трансформация спектра НПВО, выражающаяся в перераспределении интенсивности колебаний C–O–H-групп, смещении в высокоэнергетическую область и расширении полосы, обусловленной валентными колебаниями C=O. Установлено, что имплантация приводит к снижению интенсивности полосы связанных валентных колебаний O–H-групп и смещению максимума указанной полосы в низкоэнергетическую область. Обнаружено снижение интенсивности полос поглощения остаточного формальдегида, обусловленное его испарением при имплантации в вакууме. Имплантация Ag^+ замедляет «старение» фоторезиста, что обусловлено, вероятнее всего, формированием при ионной имплантации у поверхности фоторезиста компактного механически устойчивого углеродистого слоя, препятствующего проникновению видимого излучения и газов из атмосферы.

Ключевые слова: диазохинон-новолачный резист, имплантация, ионы серебра, спектры нарушенного полного внутреннего отражения.

Введение. Ионная имплантация (ИИ) широко применяется в современной электронике [1]. Ее применение позволяет с высокой точностью управлять концентрацией легирующей примеси, характеризуется универсальностью и гибкостью технологического процесса. В процессах субмикронной и нанолитографии важную роль играют диазохинонноволачные (ДХН) резисты, представляющие собой композит из светочувствительного агента – О-нафтохинондиазида – и фенолформальдегидной смолы. Они используются в современной электронике в качестве масок при ионной имплантации [2]. Кроме того, интерес к исследованию модифицированных ионным облучением полимерных материалов стимулируется постоянно возрастающим их применением в новых сферах деятельности, в частности, в космической технике и медицине [3].

Ранее показано, что при ионной имплантации полимеров радиационно-индуцированные процессы протекают не только в области пробега ионов, но и за его пределами, что приводит к существенным изменениям физико-химических свойств полимерных пленок, в частности, к их радиационному упрочнению [4], модификации спектров отражения [5–7], уменьшению показателя преломления [7] и изменению адгезионного взаимодействия с материалом подложки [8]. Методом электронного парамагнитного резонанса в имплантированных ионами бора и фосфора пленках ДХН-резиста обнаружено формирование свободных радикалов с мощной системой сопряженных >C=O- и -C=C- кратных связей [9; 10]. Однако природа радиационно-индуцированных процессов, ответственных за изменение технологических свойств ДХН-фоторезистов за областью пробега ионов, остается малоизученной.

Для исследования тонких пленок широко применяется метод ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения, позволяющий получать количественную информацию о составе и структуре сложных органических соединений и их смесей в твердом агрегатном состоянии [11; 12]. Отметим, что исследования спектров НПВО пленок ДХН-фоторезистов на поверхности пластин монокристаллического кремния, облученных ионами, ранее не проводились.

В настоящей работе с целью установления механизмов радиационно-индуцированной модификации ДХН-фоторезистов за областью пробега ионов были исследованы ИК-Фурье спектры НПВО имплантированных ионами Ag^+ пленок диазохинон-новолачного фоторезиста марки ФП9120.

Методы исследования. Пленки позитивного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,8 мкм наносились на поверхность пластин кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111) методом центрифугирования при скорости вращения 1800 об/мин. Перед формированием пленки фоторезиста (ФР) кремниевые пластины подвергали стандартному циклу очистки в органических и неорганических растворителях. Время вращения центрифуги – 40 с. После нанесения фоторезиста на рабочую сторону пластины проводилась сушка в течение 50–55 минут при температуре 88 °С. Толщина пленок фоторезиста контролировалась механическим способом на профилометре «Dectak» по пяти фиксированным точкам на каждой пластине, при этом отклонения от среднего значения по пластине для всех исследованных образцов не превышали 1%.