

03.08.11

Зависимость удельного электросопротивления на переменном токе слоев алмазоподобного углерода в наноструктуре In/DLC//Si/In от толщины DLC

© И.А. Зур¹, В.Ю. Леоненко¹, А.К. Федотов¹, Е.Е. Шманай¹, А.А. Харченко¹, Н.И. Горбачук²,
Е.А. Ермакова², С.С. Титова³, О.А. Чувенкова³, С.Ю. Турищев³, Ю.А. Федотова¹, С.А. Мовчан⁴

¹ Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
Минск, Беларусь

² Физический факультет Белорусского государственного университета,
Минск, Беларусь

³ Воронежский государственный университет,
Воронеж, Россия

⁴ Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

E-mail: zur.ilya01@gmail.com

Поступила в Редакцию 29 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 4 января 2025 г.

Принята к публикации 14 января 2025 г.

Посредством анализа спектров рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии наноразмерных DLC-покрытий подтверждено увеличение количества атомов углерода с sp^2 -гибридизацией электронных орбиталей от 8 до 21% при увеличении толщины от 22 до 46 нм. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии зафиксировано незначительное окисление и азотирование поверхности DLC. Предложена эквивалентная электрическая схема для описания частотных зависимостей импеданса слоя DLC и потенциального барьера на границе DLC//Si. Установлено, что удельное электросопротивление DLC в квазистатическом пределе уменьшается от 1000 до $1 \Omega \cdot \text{m}$ при росте толщины от 22 до 71 нм. Зафиксировано, что импеданс структуры In/DLC//Si/In может уменьшаться до 20 раз при варьировании напряжения смещения в диапазоне $-4 - +4 \text{ V}$ относительно подложки Si.

Ключевые слова: DLC-покрытие, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, импедансная спектроскопия, эквивалентная схема, зонная диаграмма, удельная электропроводность.

DOI: 10.61011/FTT.2025.02.59977.324

1. Введение

DLC (Diamond-like carbon) — метастабильная форма углерода, теплофизические [1], оптические [2] и электрофизические [3,4] свойства которой определяются отношением количества атомов с sp^2 - и sp^3 -гибридизацией электронных орбиталей. DLC-покрытия нашли применение в широком спектре задач промышленности: износостойкие покрытия [5], просветляющая оптика [6] и биосовместимые покрытия [7,8]. Не так давно область их потенциального применения расширилась — CERN (European Organization for Nuclear Research) и ОИЯИ (Объединенный институт ядерных исследований) ведут исследования по использованию DLC-покрытий в качестве резистивных слоев на электродах газоразрядных детекторов [9]. В рамках этих исследований изучена радиационная стойкость [10] и эрозионная стабильность [11] DLC-покрытий. В работе [3] показано, что удельное сопротивление на постоянном токе DLC-покрытия коррелирует с изменением структуры при увеличении толщины.

Резистивное покрытие коллекторного электрода детектора выполняет роль распределенного тонкопленоч-

ного резистора, который ограничивает ток искрового разряда. Закономерно предположить, что эффективность такого покрытия будет во многом определяться такими физическими свойствами, как удельная электропроводность на постоянном и переменном токе и диэлектрическая проницаемость [12].

В связи с этим, безусловную актуальность представляет установление корреляции между толщиной, структурой и электрическими свойствами на постоянном и переменном токе DLC-покрытий. Решение обозначенной задачи кроется в комбинации методов исследования структуры и электрических свойств покрытий. Сложность такого подхода, однако, заключается в разделении получаемой информации о свойствах подложки и непосредственно покрытия. Например, осаждение DLC-покрытия на диэлектрические подложки из полимера или стеклотекстолита исключает применение спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и инфракрасной спектроскопии для исследования структуры. Использование кремниевой подложки решает эту проблему, однако, приводит к шунтированию подложкой исследуемого DLC-покрытия, обладающего значительно

большим удельным и абсолютным электросопротивлением. В таком случае корректно измерять электросопротивление не в продольной, а в поперечной конфигурации, что в свою очередь приводит к необходимости учета барьерных эффектов на границе DLC//Si, возникающих вследствие изгиба энергетических зон.

Настоящая работа посвящена исследованию импедансных характеристик структуры In/DLC//Si/In и непосредственно DLC слоев. Целью настоящего исследования является установление корреляции между структурой DLC-покрытий и их удельным сопротивлением на постоянном и переменном токе.

2. Экспериментальные методики и оборудование

Образцы слоев DLC осаждались на подложки из кремния Si марки КДБ-8 по методике, подробно изложенной в работе [3]. Толщина слоев DLC оценивалась посредством анализа контраста изображений сканирующей электронной микроскопии, полученных на микроскопе HITACHI S-4800.

Исследования физико-химического состояния поверхности образцов были проведены неразрушающим методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с использованием анализатора энергий электронов SPECS Phoibos 150 модуля ЭСХА сверхвысоковакуумной экспериментальной станции НАНОФЭС синхротрона „Курчатов“ Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“ (Москва, Россия) [13]. Использовалось монохроматизированное AlK_{α} -излучение рентгеновской трубки (1486.61 eV). Глубина информативного слоя составила от 2 до 3 nm [14] при разрешении не хуже 0.1 eV. Для нормализации и калибровки спектров был использован стандартный подход, основанный на независимой регистрации сигнала от чистой золотой фольги ($Au4f$). Для идентификации спектральных линий использованы известные базы данных, из которых выбраны актуальные и наиболее точные спектры [14–16].

Измерения частотных зависимостей импеданса $Z(\nu)$ структуры In/DLC//Si/In на основе образцов DLC-покрытий различной толщины проводились на установке LCR Agilent E4980A в диапазоне частот зондирующего напряжения от 20 Hz до 2 MHz при амплитуде зондирующего синусоидального напряжения не превышающей 40 mV. Поперечное напряжение смещения варьировалось в диапазоне от -4 до $+4$ V и прикладывалось между индиевыми контактами на поверхности DLC-покрытия и кремниевой подложки, соответственно. Все измерения проводились при комнатной температуре в воздушной атмосфере. Анализ полученных зависимостей $Z(\nu)$ осуществлялся в программном обеспечении AfterMath Pine Reseach Instrumentation.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия DLC-покрытий

На рис. 1, *a* представлены обзорные РФЭС спектры DLC-покрытий толщиной 22 и 46 nm в диапазоне энергий связи от 0 до 1200 eV. По мере снижения интенсивности наблюдаются спектральные линии углерода $C1s$ (~ 285 eV), кислорода $O1s$ (~ 531 eV), натрия $Na1s$ (~ 1072 eV) и азота $N1s$ (~ 398 eV), а также Оже-линии $KLL Na$ (~ 508 eV), $KLL O$ (~ 984 eV).

Спектральные линии элементов Na и N характеризуются существенно меньшей интенсивностью относительно линий элементов C и O. Линия натрия, вероятно, обусловлена остаточными загрязнениями. В качестве причины наличия в спектре линий кислорода и азота может рассматриваться незначительное окисление и азотирование поверхностного слоя DLC-покрытия.

Спектральные линии $C1s$ для DLC-покрытий толщиной 22 и 46 nm, зарегистрированные с высоким разрешением наилучшим образом описываются набором компонент, представленных на рис. 1, *b*, и 1, *c* и включающих сигнал от атомов углерода с sp^2 - и sp^3 -гибридизацией электронных орбиталей. Возможные состояния атомов углерода для полученных значений энергий связи компонент разложения приведены в табл. 1. Отметим, что полученный вид спектральных линий $C1s$ характерен для образцов обеих толщин.

Возможные значения энергии связи электронов (см. табл. 1) соответствуют химическим связям C–O, C=O и C–N и подтверждают выдвинутое ранее предположение о реконструкции поверхности DLC. Полученные энергии связи электронов ≈ 284.4 eV и ≈ 285.3 eV для sp^2 - и sp^3 -гибридизаций электронных орбиталей атомов углерода, соответственно, и энергетическое расстояние между ними демонстрируют высокую степень согласия с литературными данными, представленными в табл. 1.

На рис. 2 приведен результат оценки содержания атомов углерода с sp^2 -гибридизацией электронных орбиталей $n(C_{sp^2})$, которая проведена по соотношению площадей компонент разложения линии углерода $C1s$ (см. рис. 1). Отметим, что зависимость содержания $n(C_{sp^2})$ от толщины DLC-покрытия d (см. рис. 2) коррелирует с аналогичной зависимостью, полученной ранее для исследуемой серии образцов в работе [3] посредством анализа спектров комбинационного рассеяния света. В качестве возможного объяснения тенденции увеличения количества атомов углерода с sp^2 -гибридизацией по мере увеличения толщины DLC-покрытия можно предположить следующее.

В работах [20,21] обсуждаются результаты моделирования процесса роста DLC покрытия на подложке стали и алмаза методом молекулярной динамики. Результаты обеих работ свидетельствуют о формировании

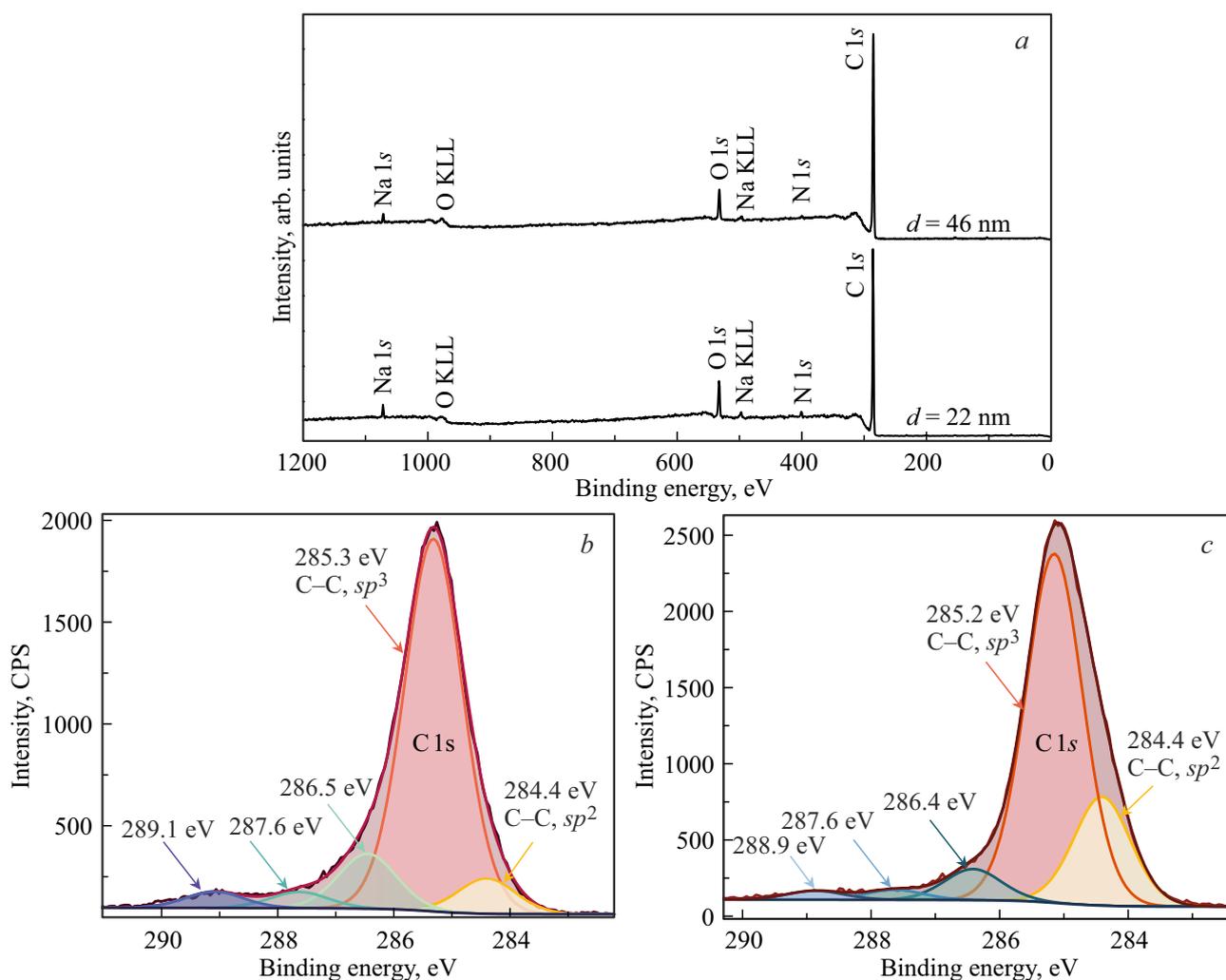


Рис. 1. Обзорные спектры РФЭС DLC-покрытий толщиной 22 и 46 nm (a) и C1s спектры РФЭС высокого разрешения DLC-покрытия толщиной 22 nm (b) и 46 nm (c). Значения энергии связи компонент спектров приведены на рисунке и в табл. 1.

Таблица 1. Результаты разложения спектральных линий с учетом sp^2 - и sp^3 -гибридизаций электронных орбиталей атомов углерода

Толщина, nm	27	46	Литературные данные
Энергия C1s компоненты, eV	C-C sp^2 284.4	C-C sp^2 284.4	284.4 ± 0.1 [16–18]
	C-C sp^3 285.3	C-C sp^3 285.2	285.2 ± 0.1 [16–18]
	286.5	286.4	286.3 (sp^2 C-N) [13] 286.4 ± 0.3 (C-O) [17,18] 285.6–286.9 (C-OH) [16]
	287.7	287.6	287.5 (sp^3 C-N) [13] 286.5–287.9 (C=O) [16]
	289.1	288.9	288.4–289.8 (C-OOH) [16] 288.6–289.0 (O-C=O) [19]

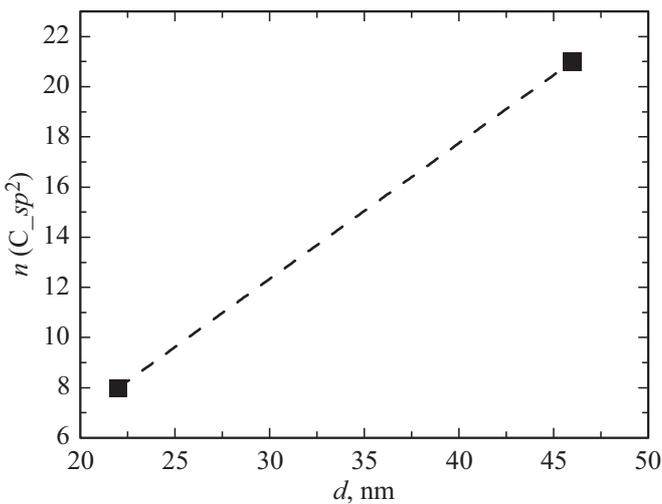


Рис. 2. Зависимость $n(C_{sp^2})$ от толщины DLC-покрытия d .

слоя из смеси атомов подложки и осаждаемого углерода (буферного слоя) толщиной $\approx 1.5-2.0$ nm. Это приводит к тому, что слой чистого DLC формируется не на исходной подложке, а на буферном слое. Следствием является неравномерное распределение внутренних напряжений вдоль толщины покрытия. В области буферного слоя преимущественно содержатся атомы с sp^3 -гибридизацией и доминируют напряжения сжатия, достигающие -10 GPa. По мере удаления от буферного слоя доля атомов углерода с sp^2 -гибридизацией увеличивается, механические напряжения меняют знак и достигают 9 GPa.

Таким образом, по мере роста DLC покрытия уменьшается вклад потенциального рельефа подложки Si и буферного слоя SiC в формирование непосредственно слоя DLC, что увеличивает вероятность локализации C в конфигурации, соответствующей менее напряженной структуре. Такого рода минимизация внутренних напряжений в системе может быть достигнута посред-

ством увеличения количества атомов углерода с sp^2 -гибридизацией электронных орбиталей.

3.2. Импедансная спектроскопия структуры In/DLC//Si/In

Фотография и схематическое изображение исследуемой структуры In/DLC//Si/In представлено на рис. 3, *a* и 3, *b*, соответственно. Первый слой структуры представляет собой DLC-покрытие с электронным типом проводимости [3,4], второй слой состоит из кремниевой подложки с дырочной проводимостью [22]. Ширина запрещенной зоны E_g у DLC-покрытий варьируется в диапазоне от 2 до 3 eV [18,23], для p -Si величина E_g равна 1.1 eV [24]. Принимая во внимание различие типа и концентрации носителей заряда, а также работ выхода в вакуум (φ_{DLC} и φ_{Si}) в DLC и Si, можно предположить возникновение энергетического барьера на границе DLC//Si вследствие выравнивания уровня Ферми E_F системы в равновесном состоянии (в отсутствие внешнего электрического поля). Схематическое изображение зонной диаграммы в равновесном состоянии структуры с указанием общего для системы E_F , φ_{DLC} и φ_{Si} для DLC и Si представлено на рис. 3, *c*.

Суммарный импеданс $Z(\nu)$ структуры определяется суммой импедансов ее компонент (импеданса $Z_{DLC}(\nu)$ непосредственно слоя DLC, импеданса $Z_{Barrier}(\nu)$ барьера на границе DLC//Si и импеданса $Z_{Si+cont}(\nu)$ подложки с электрическими контактами):

$$Z(\nu) = Z' + iZ'' = Z_{Si+cont}(\nu) + Z_{DLC}(\nu) + Z_{Barrier}(\nu), \quad (1)$$

где Z' и Z'' — вещественная и мнимая составляющие модуля импеданса Z , соответственно.

На рис. 4, *a* и 4, *b*, представлены частотные зависимости модуля импеданса $Z(\nu)$ и угла сдвига фаз $\varphi(\nu)$ структуры In/DLC//Si/In на основе слоев DLC толщиной 22 , 46 и 71 nm. Видно, что в пределе низких частот ($\nu \rightarrow 0$) модуль импеданса стремится к постоянному

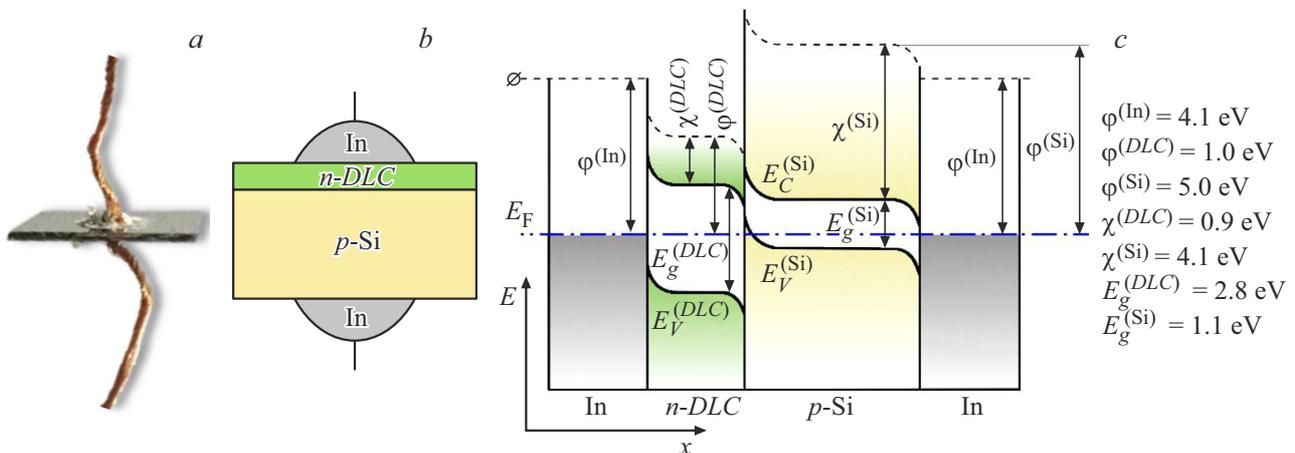


Рис. 3. Фотография (*a*), схематическое изображение (*b*) и зонная диаграмма (*c*) структуры In/DLC//Si/In.

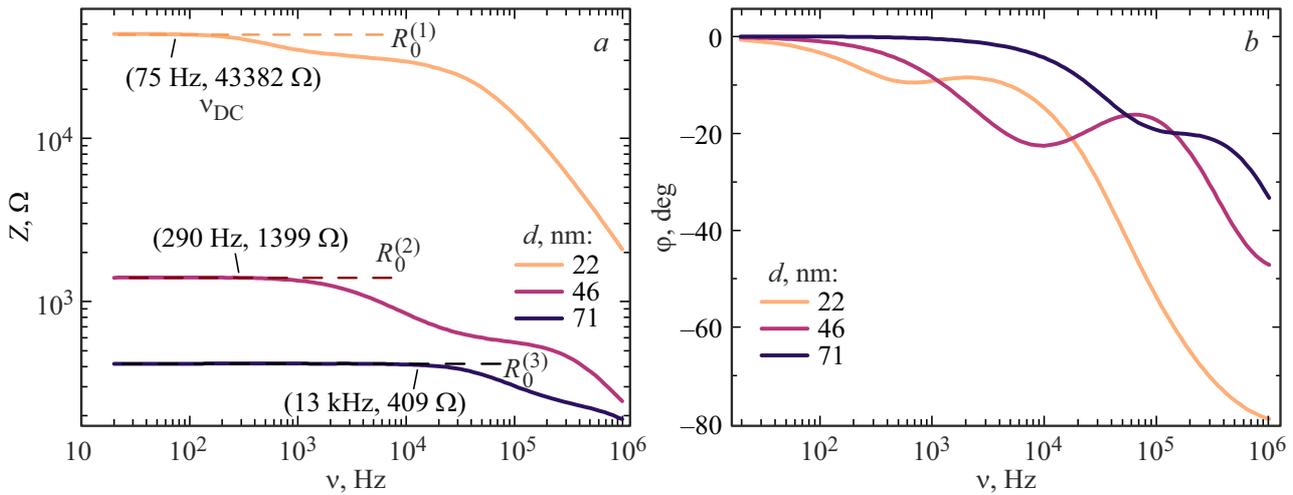


Рис. 4. Частотные зависимости модуля импеданса $Z(\nu)$ (a) и угла сдвига фаз $\varphi(\nu)$ (b) структуры In/DLC//Si/In на основе DLC слоев толщиной 22, 46 и 71 нм, полученные при $T = 293 \text{ K}$.

значению R_0 и определяется суммой активных частей $Z_{\text{DLC}}(\nu)$ и $Z_{\text{Barrier}}(\nu)$

$$Z(\nu \rightarrow 0) = R_0 = \text{Re}(Z_{\text{Si+cont}}) + \text{Re}(Z_{\text{DLC}}) + \text{Re}(Z_{\text{Barrier}}). \quad (2)$$

Вместе с тем, $\varphi(\nu \rightarrow 0)$ принимает близкие к нулю значения, что в совокупности указывает на отсутствие вклада в полный импеданс структуры емкостной составляющей.

При увеличении толщины DLC-покрытия, частота ν_{DC} , при которой отклик системы на зондирующее напряжение аналогичен отклику на постоянный ток, смещается в область больших значений. Как видно из рис. 4, a, отклонение Z от R_0 наблюдается при частоте 75 Hz для образца с DLC-покрытием толщиной 22 nm и при $\nu_{DC} = 13 \text{ kHz}$ для образца с $d = 71 \text{ nm}$. Частотная зависимость полного импеданса структуры $Z(\nu)$, однако, не дает информации об электрических свойствах непосредственно DLC слоя.

Из рис. 5, a следует, что на зависимостях $-Z''(\nu)$ выделяются два резонанса (максимума): низкочастотный ($\nu_{\text{res}}^{(I)}$ от 0.5 до 68 kHz) и высокочастотный ($\nu_{\text{res}}^{(II)}$ от 80 до 480 kHz), которые соответствуют слагаемому барьера и слоя DLC в соотношении (1). При этом, чем больше толщина слоя DLC, тем большие значения принимают частоты ν_{DC} , $\nu_{\text{res}}^{(I)}$ и $\nu_{\text{res}}^{(II)}$.

Основываясь на зонной диаграмме (см. рис. 3, c) и зависимостях $-Z''(\nu)$ структуры In/DLC//Si/In, закономерно предположить наличие в эквивалентной схеме (ЭС) двух последовательно включенных R/CPE-контуров (см. рис. 5, b). Эти контуры описывают Z' и Z'' составляющие импеданса энергетического барьера на границе DLC//Si и, собственно, DLC-покрытия. Электрическое сопротивление контактов и кремниевой подложки определяется резистивным элементом R_0 . Определив параметры ЭС (см. рис. 5, b) можно получить

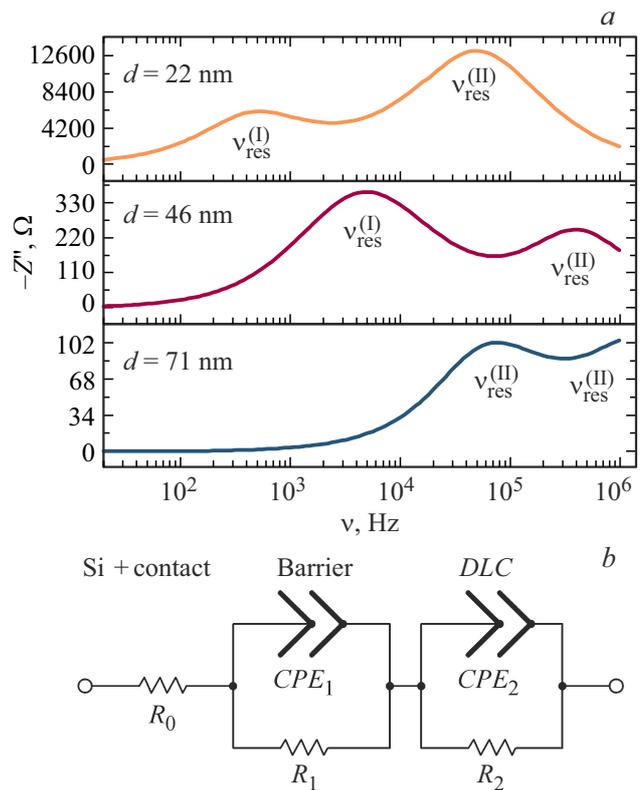


Рис. 5. Частотная зависимость мнимой составляющей импеданса $-Z''$ (a) и эквивалентная схема (b) структуры In/DLC//Si/In.

зависимость импеданса Z_{DLC} и его удельного электросопротивления ρ от толщины d .

Использование элемента постоянной фазы CPE в эквивалентной схеме позволяет учесть влияние морфологии границы DLC//Si на геометрическую емкость [25]. Критерий согласия χ^2 для аппроксимации зависимостей

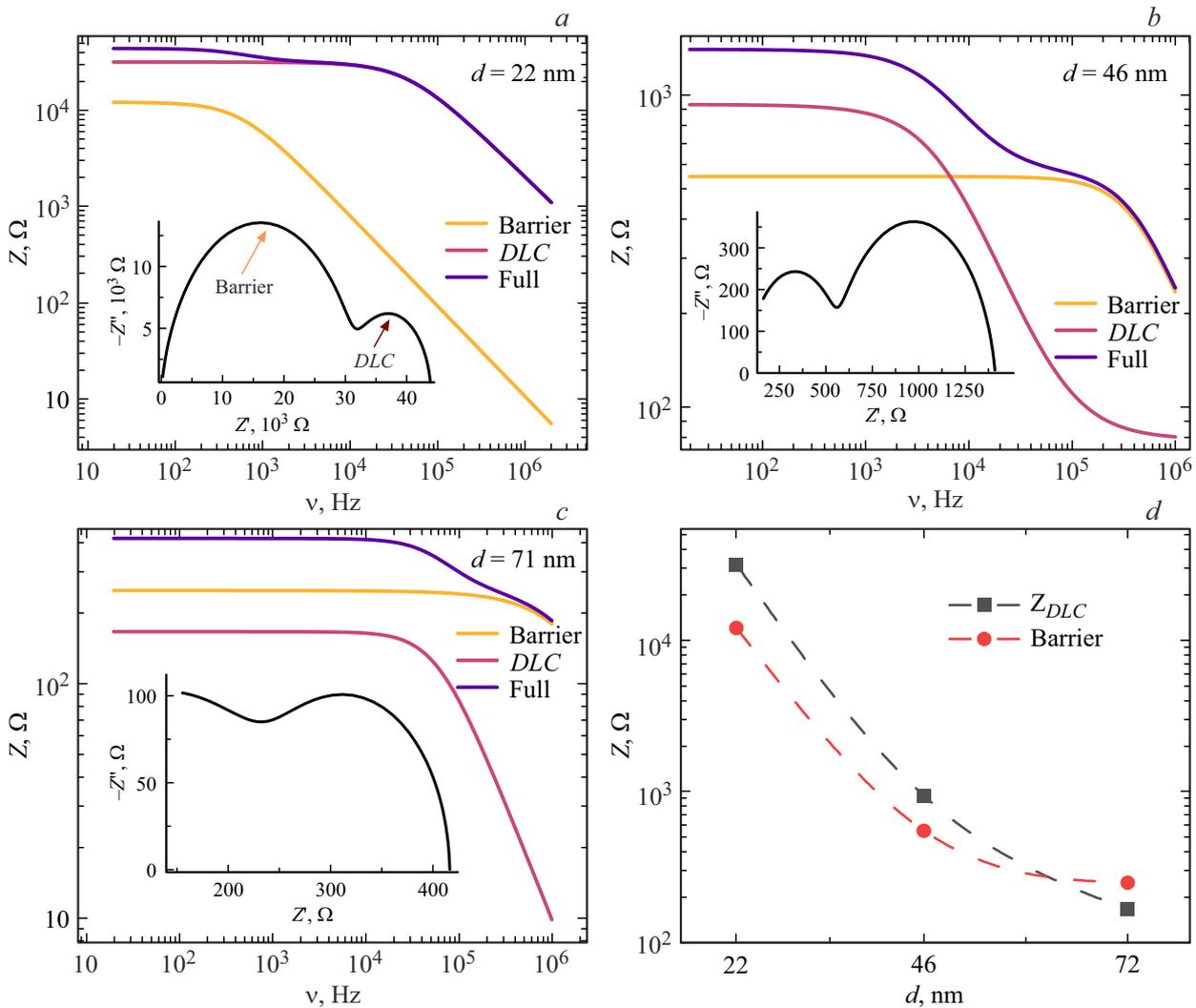


Рис. 6. (a–c) — Частотные зависимости полного импеданса структуры In/DLC//Si/In $Z_{full}(\nu)$, и вкладов в импеданс подконтуров $Z_{Barrier}(\nu)$ и Z_{DLC} для DLC-слоев толщиной 22 (a), 46 (b) и 71 (c) nm; d — зависимость $Z_{Barrier}$ и Z_{DLC} от толщины d при $\nu = 20$ Hz.

$Z(\nu)$ эквивалентной схемой с элементом CPE приблизительно равен 0.003, против $\chi^2 \approx 0.683$ для схемы с конденсатором

$$Z(CPE) = \frac{1}{\omega C^\alpha}, \quad (3)$$

где $\alpha = 1$ описывает частотную зависимость импеданса конденсатора емкостью C , $\alpha \in 0.8-1.0$ соответствует так называемому „фрактальному конденсатору“ [25].

На рис. 6, a–c представлены частотные зависимости полного импеданса $Z_{full}(\nu)$ структуры In/DLC//Si/In, импеданса подконтра барьера $Z_{Barrier}(\nu)$ и подконтра DLC-слоя $Z_{DLC}(\nu)$. При частотах зондирующего напряжения $\nu < \nu_{DC}$ для образцов DLC-покрытия толщиной 22 и 46 nm импеданс Z_{DLC} значительно превышает $Z_{Barrier}$ и только для образца с $d = 71$ nm $Z_{DLC} < Z_{Barrier}$.

На вставке рис. 6, a изображены годографы импеданса $-Z''$ vs Z' структуры In/DLC//Si/In, которые представляют собой пару перекрывающихся полуокружностей, что

указывает на близкие времена релаксации заряда у DLC и барьера DLC//Si. Центры полуокружностей находятся в области низких и высоких частот, что на кривых $Z(\nu)$ (см. рис. 5, a) соответствует первому $\nu_{res}^{(I)}$ и второму $\nu_{res}^{(II)}$ резонансу R/CPE-контуров, описывающих барьер и DLC-покрытие.

Как видно из рис. 6, d, и импеданс DLC-покрытия, и импеданс барьера уменьшаются с ростом d . При этом $Z_{Barrier}(\nu)$ стремится к некоторому постоянному значению. Частотные зависимости Z''_{DLC} и Z'_{DLC} приведены в приложении.

В табл. 2 приведены значения параметров компонент эквивалентной схемы структуры In/DLC//Si/In, полученные на основе годографов.

Структура In/DLC//Si/In ассиметрична по типу и концентрации носителей заряда. Это закономерно приводит к предположению о зависимости ее импеданса (Z_{full}) от полярности и амплитуды поперечного напряжения

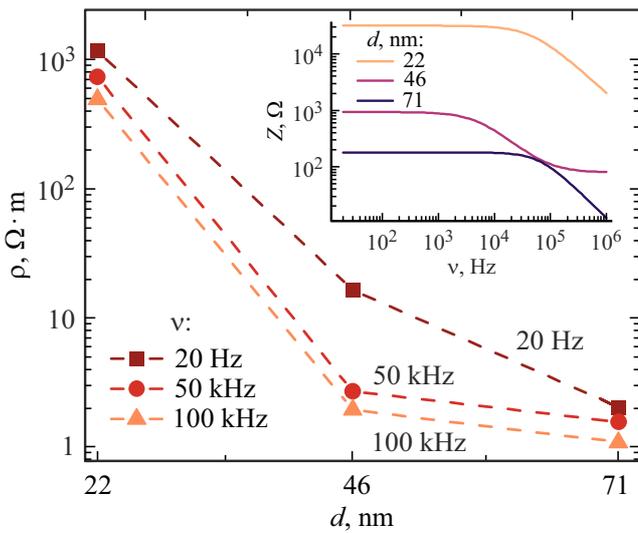


Рис. 7. Зависимость удельного электросопротивления слоя DLC от толщины d . На вставке приведены частотные зависимости полного импеданса DLC-покрытия толщиной 22, 46 и 71 нм.

Таблица 2. Значения параметров эквивалентной схемы структуры In/DLC//Si/In

Параметр	Толщина		
	22 nm	46 nm	71 nm
CPE_1 , nF	41.2	1.2	6.7
α_1	0.94	0.97	0.83
CPE_2 , nF	0.4	124.0	16.1
α_2	0.89	0.88	1
R_0 , Ω	9.93	78.23	0.1
R_1 , Ω	12 190	472.5	249.8
R_2 , Ω	31 750	860.3	166.6

Таблица 3. Параметры аппроксимации функцией вида (4) кривых $Z(U_{bias})$ образцов на основе слоев DLC толщиной 22, 46 и 71 нм

d , nm	22	46	71
$Z_{min}, \Omega (U_{bias} = -4 V)$	9811	94 ± 11	410 ± 6
$Z_{max}, \Omega (U_{bias} = +4 V)$	14787	1816 ± 22	2914 ± 12
U_1 , V	—	0.075 ± 0.005	-0.005 ± 0.004
U_2 , V	—	0.83 ± 0.16	0.49 ± 0.04
k_1 , V	—	-0.07 ± 0.01	-0.10 ± 0.005
k_2 , V	—	-0.93 ± 0.09	-0.82 ± 0.03
p	—	0.67 ± 0.02	0.59 ± 0.01

смещения U_{bias} . Условимся считать структуру прямосмещенной, если напряжение $U_{bias} > 0 V$ прикладывается к кремниевой подложке (и $U_{bias} < 0 V$ прикладывается к DLC-слою, соответственно) и обратносмещенной, когда $U_{bias} < 0 V$ прикладывается к кремниевой подложке.

3.3. Зависимость параметров структуры In/DLC//Si/In от напряжения смещения

Из рис. 8, *a–c*, видно, что увеличение U_{bias} в обратносмещенной схеме сопровождается ростом Z_{full} при $\nu < \nu_{DC}$. При этом на кривых $Z(\nu)$ постепенно пропадает один резонанс и на годографах импеданса (см. рис. 8, *d–f*) выделяется только одна полуокружность. Можно предложить, что происходит увеличение импеданса барьера $Z_{Barrier}$ и вклад Z_{DLC} становится несущественным. Увеличение U_{bias} в прямом направлении, напротив, приводит к подавлению барьера и, как следствие, уменьшению Z_{full} .

На рис. 9 представлена зависимость полного импеданса Z_{full} от амплитуды прикладываемого к структуре напряжения смещения U_{bias} при частоте зондирующего напряжения $\nu = 100 Hz$. В зависимости от полярности U_{bias} импеданс Z_{full} характеризуется двумя предельными значениями: минимальный импеданс Z_{min} при прямом смещении и максимальный Z_{max} в обратном, что в целом аналогично поведению $p-n$ -перехода в открытом и закрытом состоянии.

Для образцов на основе слоев DLC толщиной 46 и 71 нм кривые $Z(U_{bias})$ для структуры In/DLC//Si/In при $\nu = 100 Hz$ могут быть аппроксимированы функцией вида (4), в табл. 3 представлены параметры аппроксимации

$$Z(U_{bias}) = Z_{min} + A \left[\frac{p}{1 + e^{(U_{bias}-U_1)/k_1}} + \frac{1-p}{1 + e^{(U_{bias}-U_2)/k_2}} \right], \tag{4}$$

где Z_{min} — предельное значение импеданса структуры в „открытом“ состоянии, $A = Z_{max} - Z_{min}$ — разница

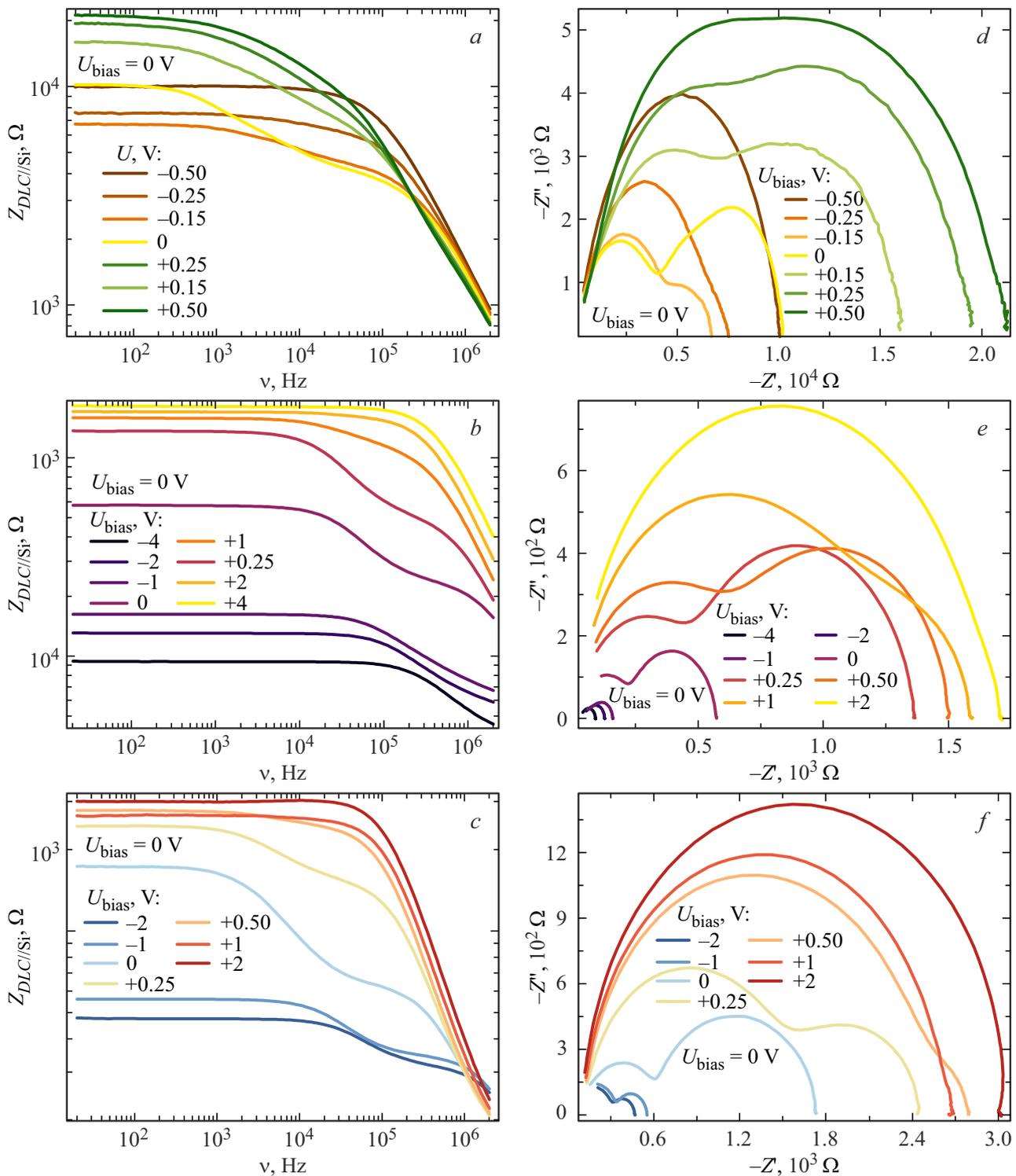


Рис. 8. Частотная зависимость полного импеданса Z_{full} (a–c) и годографы импеданса (d–f) структуры In/DLC/Si/In на основе слоев DLC толщиной 22, 46 и 71 нм, соответственно.

между предельными значениями импеданса структуры в „прямосмещенном“ и „обратносмещенном“ состояниях, p — вклад первой и второй подсистемы в общий импеданс, U_1 и U_2 — напряжения смещения, при которых достигается 0.5A для первой и второй подсистем,

соответственно, k_1 и k_2 — параметры, определяющие крутизну кривой.

Для структуры со слоем DLC толщиной 22 нм начиная с $|U_{bias}| > 1.5$ V Z_{full} имеет тенденцию к уменьшению в независимости от полярности напряжения смещения.

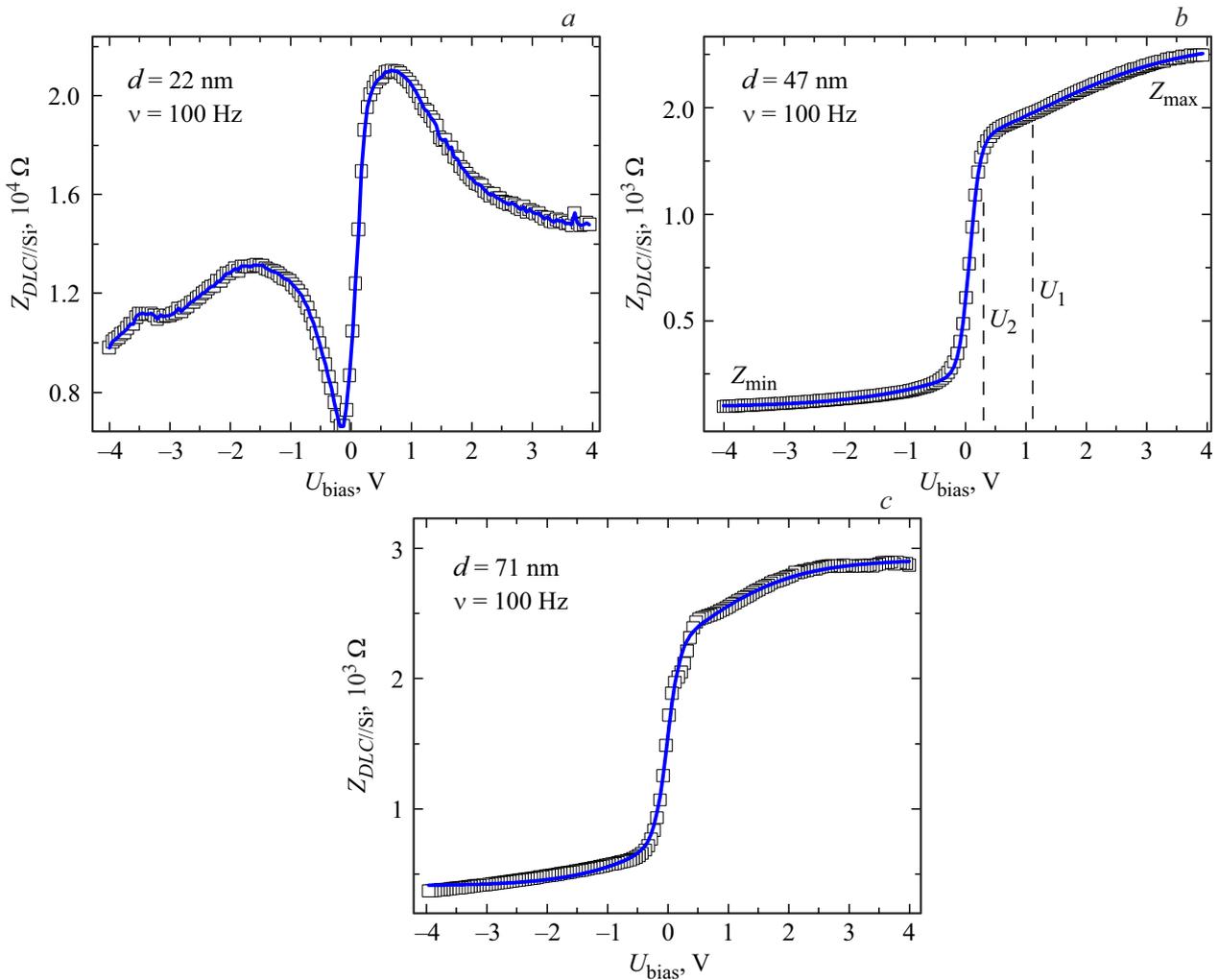


Рис. 9. Зависимость полного импеданса Z_{full} структуры от напряжения смещения U_{bias} при частоте зондирующего напряжения 100 Hz для структур со слоем DLC толщиной 22 (a), 46 (b) и 71 nm (c).

Такое отличное от образцов толщиной 46 и 71 nm поведение можно интерпретировать как следствие инжекции электронов из индиевых электродов или кремниевой подложки.

Зависимость удельного электросопротивления DLC-покрытия ρ от толщины d (устранен вклад $Z_{Barrier}$) при частотах зондирующего напряжения от 20 Hz до 100 kHz (рис. 7) коррелирует с аналогичной зависимостью, полученной в работе [3].

При увеличении напряжения смещения в положительном направлении ($U_{bias} > 0$ В прикладывается к Si) увеличивается размер области пространственного заряда вблизи интерфейса DLC//Si и, как следствие, компонента $Z_{Barrier}$ в соотношении (1) вносит основной вклад в полный импеданс структуры. Соответственно, из схемы замещения можно исключить один R/CPE -контур, описывающий импеданс DLC-покрытия, так как $Z_{Barrier} \gg Z_{DLC}$.

При приложении к DLC отрицательного напряжения ($U_{bias} < 0$ В) наоборот происходит уменьшение полного

импеданса структуры относительно $Z(U_{bias} = 0$ В), что объясняется подавлением барьера и инжекцией неравновесных носителей заряда из индиевого электрода или кремниевой подложки в объем DLC-слоя [3]. ЭС при такой схеме включения остается неизменной.

4. Заключение

Посредством анализа данных рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) наноразмерных DLC-покрытий подтверждено увеличение количества атомов углерода с sp^2 -гибридизацией электронных орбиталей от 8 до 21% при увеличении толщины от 22 до 46 nm. Обнаружено, что атомы углерода поверхностного слоя DLC образуют химические связи C–O, C=O и C–N, что указывает на незначительное окисление и азотирование DLC в процессе реконструкции после открытия вакуумной камеры.

Изучение полного импеданса, его мнимой и действительной частей в структуре In/DLC//Si/In в области частот от 20 Hz до 2 MHz позволило сформировать ее электрическую эквивалентную схему. Предложенная ЭС состоит из двух последовательно включенных R/CPE-контуров и последовательного сопротивления и позволяет факторизовать вклады в полный импеданс структуры потенциального барьера интерфейсе DLC//Si и непосредственно слоя DLC. Вид ЭС проявляется в форме годографов, которые состоят из двух неразрешенных полуокружностей, параметры которых зависят от толщины слоя DLC и напряжения смещения. Анализ параметров компонент эквивалентной схемы структуры позволяет заключить, что увеличение толщины слоя DLC от 22 до 71 nm приводит к уменьшению удельного электросопротивления от 1000 до $1 \Omega \cdot \text{m}$ в квазистатическом пределе.

Отклик импеданса структуры In/DLC//Si/In на напряжение смещения аналогичен поведению *p-n*-перехода в

прямосмещенном и обратносмещенном состоянии. Это объясняется формированием потенциального барьера на интерфейсе DLC//Si вследствие различия в типе и концентрации носителей заряда в DLC-слое и Si-подложке. В соответствии с этим, импеданс структуры In/DLC//Si/In может изменяться в 20 раз в зависимости от полярности и амплитуды напряжения смещения, которое управляет параметрами области пространственного заряда на интерфейсе DLC//Si.

Из полученных результатов можно заключить, что удельное электросопротивление слоя DLC в широкой области частот электрического поля однозначно определяется концентрацией атомов углерода с *sp*²-гибридизацией электронных орбиталей. Контролируя полярность и амплитуду внешнего напряжения смещения, можно управлять параметрами структуры In/DLC//Si/In. Полученные результаты могут быть полезны при создании GEM-детекторов с резистивным покрытием коллекторного электрода.

Приложение

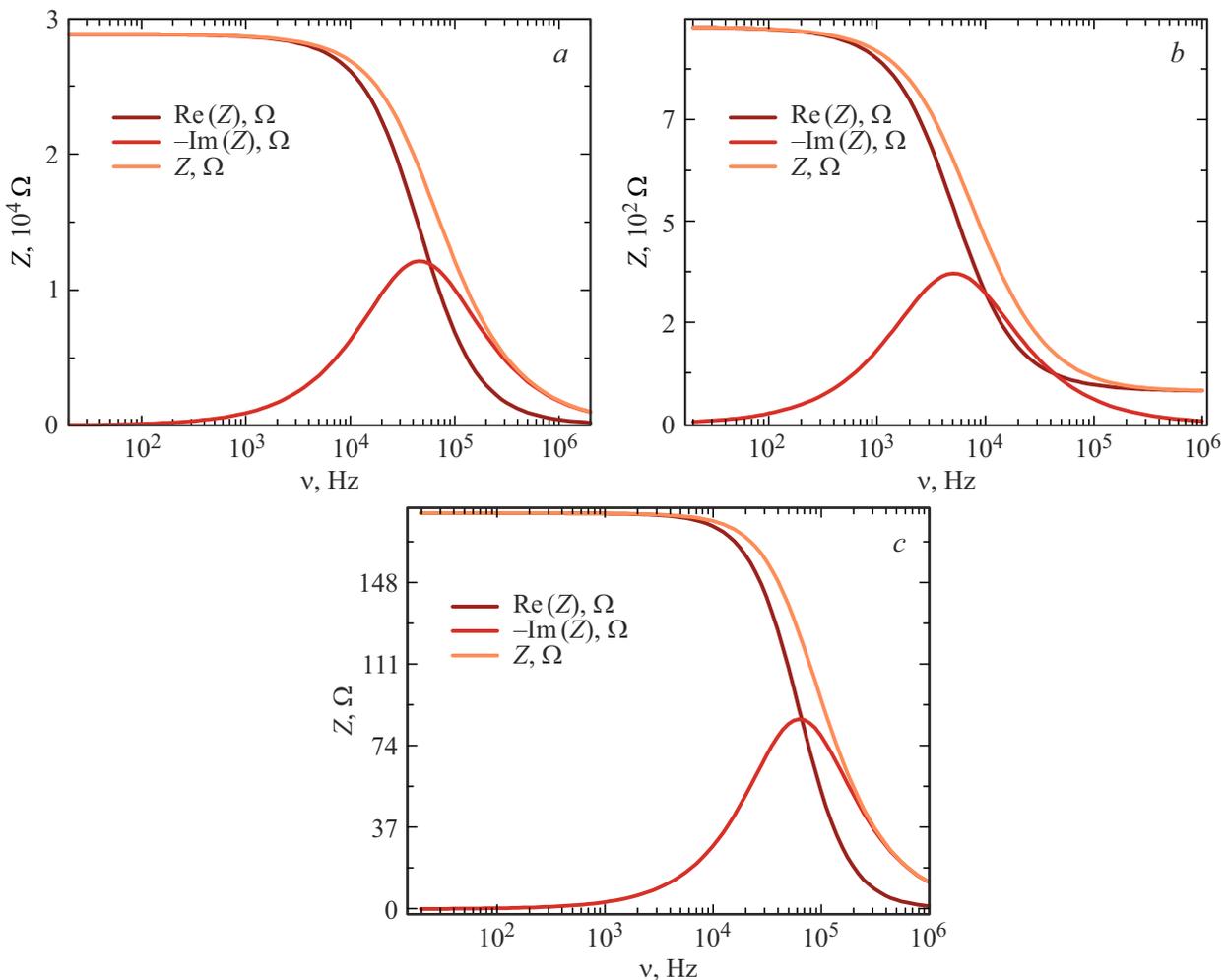


Рис. А1. Частотная зависимость полного импеданса $Z_{DLC}(\nu)$, мнимой Z'' и вещественной Z' составляющий импеданса DLC-слоев толщиной 22 (a), 46 (b) и 71 nm (c).

Благодарности

Работа частично финансировалась в рамках государственной программы научных исследований ГПНИ „Фотоника и электроника для инноваций“, 2021–2025 годы, „Микро- и нанoeлектроника“) № г.р. 20212560. Исследования методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения № 075-15-2021-1351. Авторы выражают благодарность старшему преподавателю кафедры физики твердого тела и нанотехнологий А.В. Ларькина за обсуждение полученных результатов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, договор Ф23М-099.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Shamsa, W. Liu, A. Balandin, C. Casiraghi, W. Milne, A. Ferrari. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 161921 (2006).
- [2] F. Stock, F. Antoni, F. Le Normand, D. Muller, M. Abdesselam, N. Boubiche, I. Komissarov. *Appl. Phys. A* **123**, 590 (2017).
- [3] И.А. Зур, Е.Е. Шманай, Ю.А. Федотова, А.А. Харченко, С.А. Мовчан. *ФТГ* **65**, 49 (2023).
- [4] A. Grill, V. Patel, S. Cohen. *Diam. Relat. Mater.* **3**, 281 (1994).
- [5] <http://www.dlc.ru/oblasti-primeneniya/detali-i-mehanizmy/>.
- [6] C.R. Lin, D.H. Wei, C.K. Chang, W.H. Liao. *Phys. Procedia* **18**, 46 (2011).
- [7] П.А. Августовский. *Инновационные технологии и образование*. — 2022. — С. 288–291.
- [8] Y. Deng. <https://proleantech.com/ru/dlc-coating-comprehensive-guide/>.
- [9] J. Metcalfe, I. Mejia, J. Murphy, M. Quevedo, L. Smith, J. Alvarado, B. Gnade, H. Takai. arXiv:1411.1794 [Her-Ex, Physics:Physics] (2014).
- [10] А.А. Харченко, И.А. Зур, Ю.А. Федотова, *Химия высоких энергий* **56**, 378 (2022).
- [11] I. Zur, Y. Shmanay, J. Fedotova, G. Remnev, S. Movchan, V. Uglov, *Diam. Relat. Mater.* **142**, 110802 (2024).
- [12] I.A. Zur, A.S. Fedotov, A.A. Kharchanka, Y.E. Shmanay, J.A. Fedotova, S.A. Movchan. *Nonlinear Phenomena in complex systems*. **26**, 4, 393–400 (2023).
- [13] Y.S. Zou, Q.M. Wang, H. Du, G.H. Song, J.Q. Xiao, J. Gong, C. Sun, L.S. Wen. *Appl. Surf. Sci.* **241**, 295 (2005).
- [14] C.K. Park, S.M. Chang, H.S. Uhm, S.H. Seo, J.S. Park. *Thin Solid Films* **420–421**, 235 (2002).
- [15] N. Dwivedi, S. Kumar, H.K. Malik, Govind, C.M.S. Rauthan, O.S. Panwar, *Applied Surface Science* **257**, 6804 (2011).
- [16] B. Lesiak, N. Rangam, P. Jiricek, I. Gordeev, J. Tóth, L. Kövér, M. Mohai, P. Borowicz, *Front. Chem.* **7** (2019).
- [17] P. Mérel, M. Tabbal, M. Chaker, S. Moisa, J. Margot. *Appl. Surf. Sci.* **136**, 105 (1998).
- [18] H. Sheng, W. Xiong, S. Zheng, C. Chen, S. He, Q. Cheng. *Carbon Lett.* **31**, 929 (2021).
- [19] F. Xiao, W. Li, L. Fang, D. Wang. *J. Hazard. Mater.*, **308**, 11 (2016).
- [20] W. Xiaoqiang, Z. Xu, H. Xiangyi, T. Yingjian, W. Haojie, F. Haoran, L. Huimin. *Sci. Rep.* **14** (2024).
- [21] N. Kametani, M. Nakamura, K. Yashiro, T. Takaki. *Comput. Mater. Sci.* **209**, 111420 (2022).
- [22] <https://russkijmetall.ru/redkozemelnyy-metall-i-dr/kremniy-metallicheskiy/kremniy-kristallicheskiy/kremniy-monokristallicheskiy/plastiny-kremniya-monokristallicheskogo-kef/>.
- [23] A. Evtukh, V.G. Litovchenko, M. Strikha, A. Kurchak, O. Yilmazoglu, H. Hartnagel. *Ukr. J. Phys.* **62**, 526 (2017).
- [24] L. Hao, Y. Liu, W. Gao, Z. Han, Q. Xue, H. Zeng, Z. Wu, J. Zhu, W. Zhang. *J. Appl. Phys.* **117**, 114502 (2015).
- [25] Ю.В. Емельянова, М.В. Морозова, З.А. Михайловская, Е.С. Буянова. *Импедансная спектроскопия: теория и применение* (Издательство Уральского университета, Екатеринбург, 2017).

Редактор А.Н. Смирнов