

УДК 621.315.592

В.А. НОВИКОВ<sup>1</sup>, А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ<sup>1,2</sup>, С.Н. НЕСМЕЛОВ<sup>1</sup>, С.М. ДЗЯДУХ<sup>1</sup>, Т.Н. КОПЫЛОВА<sup>2</sup>,  
К.М. ДЕГТЯРЕНКО<sup>3</sup>, Е.В. ЧЕРНИКОВ<sup>2</sup>, В.М. КАЛЫГИНА<sup>1</sup>

### ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЕНТАЦЕНА С ДИЭЛЕКТРИКОМ SiO<sub>2</sub> \*

В широком диапазоне частот и температур экспериментально исследован адмиттанс МДП-структур на основе органических пленок пентацена, сформированных методом термовакuumного напыления на подложках из SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур с диэлектриком SiO<sub>2</sub> практически не имеют гистерезиса. Показано, что при температурах 150–300 К в структурах формируется инверсионный слой при больших положительных смещениях. Концентрация дырок в пентацене, определенная из емкостных измерений, превышает 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup> и практически не зависит от температуры и частоты. Экспериментальные частотные зависимости адмиттанса МДП-структур с диэлектриком SiO<sub>2</sub> хорошо согласуются с результатами расчета при помощи метода эквивалентных схем. Для структур со слоем Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обнаружена отрицательная дифференциальная проводимость диэлектрика, что требует усложнения эквивалентной схемы. Показана возможность использования низкотемпературных измерений адмиттанса для исследования ловушек в объеме пленки пентацена.

**Ключевые слова:** органический полупроводник, пентацен, МДП-структура, SiO<sub>2</sub>, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, адмиттанс, эквивалентные схемы, низкотемпературные измерения, инверсионный слой, объемные ловушки.

#### Введение

В последние годы возрастает интерес к исследованиям электрофизических характеристик пленок органических полупроводников и границ раздела неорганических и органических материалов [1, 2]. Традиционные методики, разработанные для характеризации кремниевых МОП-структур [3], не всегда применимы для исследований МДП-структур на основе органических пленок и требуют адаптации к новому объекту исследований. В настоящее время разработаны, например, методики MIS-CELIV [4], нелинейной спектроскопии импеданса [5], измерения тока смещения [6], нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней [7].

Измерение адмиттанса органических МДП-структур при различных частотах и напряжениях обеспечивает получение важной информации о свойствах органической пленки и границы раздела диэлектрик – органический полупроводник [8–11]. Подавляющее большинство экспериментальных исследований адмиттанса выполнено при температурах, близких к комнатной. Измерения в более широком температурном диапазоне могут дать новую информацию о физических процессах в исследуемых структурах (что показано, например, при исследованиях адмиттанса МДП-структур на основе неорганических полупроводников [12, 13], импеданса структур металл – органический полупроводник – металл [14], вольт-фарадных характеристик (ВФХ) диодов на основе пентацена [15]). Известны исследования подвижности в транзисторах на основе органических полупроводников при охлаждении до 8–10 К [16], но низкотемпературные измерения емкости или адмиттанса органических структур проводились при более высоких температурах (от 100–150 К).

Выбор органического полупроводника обусловлен тем, что пентацен можно рассматривать в качестве модельного материала, поскольку он относительно хорошо изучен из-за перспектив использования в приборах органической электроники (например, в тонкопленочных транзисторах (OTFT), солнечных элементах, устройствах памяти [17, 18]).

При разработках OTFT часто используют SiO<sub>2</sub> [19], но возрастает интерес к использованию затворных диэлектриков других типов с более высокой диэлектрической проницаемостью [20, 21], что перспективно для снижения управляющих напряжений транзистора. Одной из проблем использования новых диэлектрических слоев является значительный гистерезис рабочих характеристик, вызванный высокой плотностью медленных состояний на границе раздела диэлектрик – пентацен [22]. Известны исследования возможности использования двухслойного диэлектрика SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в полевых транзисторах на основе GaN [23, 24].

\* Технология создания структур для исследований разработана при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров в рамках проекта № 8.1.44.2018. Исследования электрофизических характеристик проведены при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта р\_а № 18–43–700005.

Целью данной работы является экспериментальное исследование процессов в МДП-структурах на основе пентацена с диэлектриками  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  при помощи измерений полевых, частотных и температурных зависимостей адмиттанса в широком диапазоне условий измерения.

### Образцы и методики измерений

Для исследований было создано два типа МДП-структур на основе пентацена: с диэлектриком  $\text{SiO}_2$  (рис. 1, а) и с двухслойным диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  (рис. 1, б). В качестве подложек использовались слои высоколегированного кремния электронного типа проводимости с нанесенными сверху слоями  $\text{SiO}_2$  толщиной 220–260 нм (производства «Fraunhofer»). Для части структур на поверхность  $\text{SiO}_2$  методом магнетронного распыления наносился слой  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  толщиной 190–240 нм. Для перевода аморфной пленки в  $\beta$ -фазу пленка  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  подвергалась термоотжигу при температуре 900 °С [25]. Затем проводилась обработка пленки  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  в кислородной плазме для насыщения вакансий кислорода. Перед формированием слоя пентацена структуры промывались в изопропиловом спирте с последующей обработкой в кислородной плазме для очистки поверхности. Пентацен создавался методом термовакuumного напыления и имел толщину 50 нм. Электрические контакты из Au формировались при помощи термического напыления в вакууме через маску с отверстиями. Площадь электродов определялась для каждой структуры при помощи специальной микроскопической методики. Омический контакт к подложке из высокопроводящего  $n$ -Si создавался вплавлением In методом электрического пробоя. Исследовано несколько структур каждого типа, большая часть приведенных экспериментальных результатов по изучению адмиттанса МДП-структур с диэлектриком  $\text{SiO}_2$  относится к образцу № 1, а структур с двухслойным диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  – к образцу № 2. Площади обратного электрода из Au для структур № 1 и 2 составили 0.68 и 1.09  $\text{мм}^2$  соответственно.

Измерения проводились при помощи автоматизированной установки для спектроскопии адмиттанса наногетероструктур, в состав которой входили измеритель иммитанса Agilent E4980A и неоптический криостат Janis. Установка позволяла измерять зависимости адмиттанса от температуры (8–300 К), частоты (1–2000 кГц), напряжения смещения (от –40 до 40 В). За прямое направление развертки напряжения принимается изменение напряжения смещения от отрицательных значений к положительным, а за обратное – от положительных к отрицательным. Для анализа экспериментальных зависимостей адмиттанса использовался метод эквивалентных схем [10, 11, 26–28]. На рис. 1, в приведена эквивалентная схема МДП-структуры на основе пентацена в режиме обеднения [28].

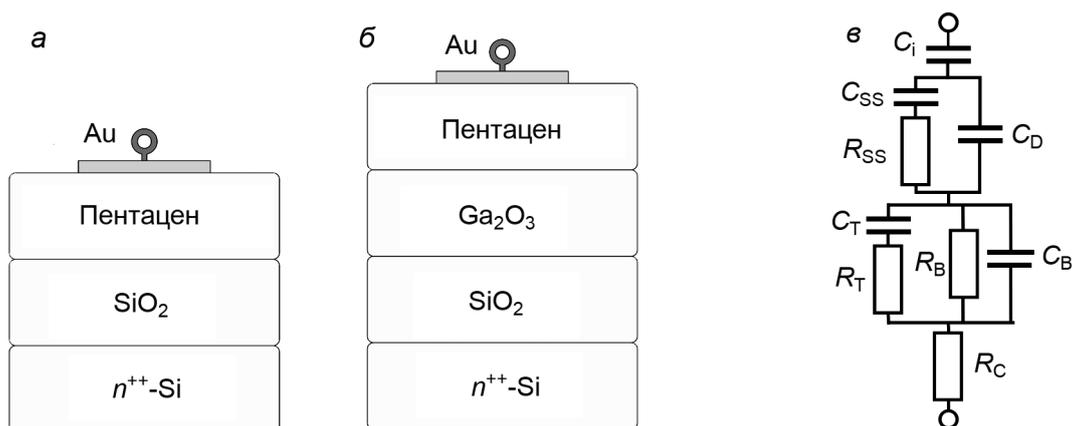


Рис. 1. Схематическое изображение МДП-структур на основе пентацена с диэлектрическим слоем  $\text{SiO}_2$  (а) и с двухслойным диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  (б), а также эквивалентная схема МДП-структуры на основе органического полупроводника в режиме обеднения (в):  $C_i$  – емкость диэлектрического слоя;  $C_B$  и  $R_B$  – емкость и сопротивление объема органической пленки;  $R_C$  – сопротивление обратного контакта;  $C_D$  – емкость обедненного слоя;  $C_{SS}$  и  $R_{SS}$  – емкость и сопротивление перезарядки дискретного уровня поверхностных состояний;  $C_T$  и  $R_T$  – емкость и сопротивление уровня ловушек в объеме пентацена

При экспериментальных исследованиях использовалась параллельная схема замещения, то есть определялись параллельно соединенные емкость ( $C$ ) и проводимость ( $G$ ) МДП-структуры.

Для характеристики процессов в МДП-структурах часто используют нормированную на циклическую частоту  $\omega$  проводимость МДП-структуры  $L = G/\omega$ . Если из полного импеданса МДП-структуры вычесть емкостное сопротивление диэлектрического слоя, то можно найти параллельные емкость ( $C_p$ ) и проводимость ( $G_p$ ,  $L_p = G_p/\omega$ ), которые характеризуют свойства пленки органического полупроводника с учетом сопротивления обратного контакта (схема рис. 1,  $b$  без элемента  $C_i$ ). Выражения для значений элементов эквивалентной схемы приведены в работе [28].

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Из рис. 2, где приведены ВФХ МДП-структуры № 1 с диэлектриком SiO<sub>2</sub>, измеренные при различных температурах, видно, что органический полупроводник имеет дырочный тип проводимости, а гистерезис ВФХ при температуре 300 К практически отсутствует. При достаточно высоких температурах (150–300 К) и положительных напряжениях, превышающих 30 В, происходит насыщение измеряемой емкости на минимальном уровне  $C_{\min}$ . Емкость диэлектрика при охлаждении несколько уменьшается, что может быть связано с температурной зависимостью диэлектрической проницаемости SiO<sub>2</sub>, причем наибольшее снижение происходит при охлаждении от 300 до 200 К. При температурах, меньших 50 К, на ВФХ всех исследованных образцов наблюдался небольшой провал вблизи нулевого напряжения.

Геометрическую емкость МДП-структуры ( $C_G$ ) можно рассчитать по формулам

$$C_G = \frac{C_i C_g}{C_i + C_g}, \quad C_g = \frac{\epsilon_S \epsilon_0 S}{d_S},$$

где  $C_g$  – емкость пленки пентацена при полном её обеднении дырками;  $\epsilon_S$  – относительная диэлектрическая проницаемость пентацена, которая при оценках предполагалась равной 3,8;  $\epsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $S$  – площадь электрода МДП-структуры;  $d_S$  – толщина пленки пентацена. При температуре 300 К для МДП-структуры № 1  $C_G$  оказалась равна примерно 73,24 пФ ( $C_g = 457,37$  пФ). Поскольку насыщение емкости при положительных напряжениях происходит при больших значениях емкости ( $C_{\min}$  более 83 пФ при 300 К), то его нельзя связать с полным обеднением дырками пленки пентацена. Это означает, что в приповерхностной области органической пленки формируется инверсионный слой, который принимает участие в экранировке электрического поля, создаваемого внешним напряжением. На рис. 3 для той же структуры показаны фрагменты ВФХ в области больших положительных напряжений (25–40 В), измеренные при разных температурах.

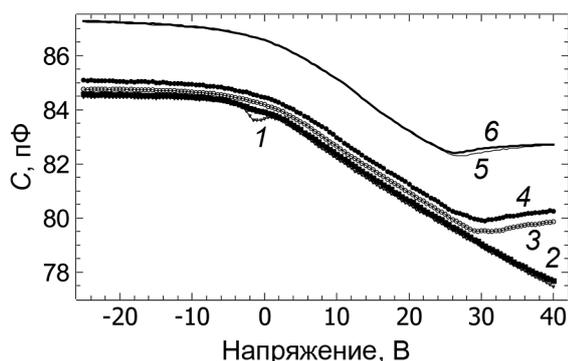


Рис. 2. ВФХ МДП-структуры № 1 с диэлектриком SiO<sub>2</sub>, измеренные на частоте 50 кГц при прямой (кр. 1–5) и обратной (кр. 6) развертке напряжения при различных температурах, К: кр. 1 – 30; кр. 2 – 77; кр. 3 – 150; кр. 4 – 200; кр. 5, 6 – 300

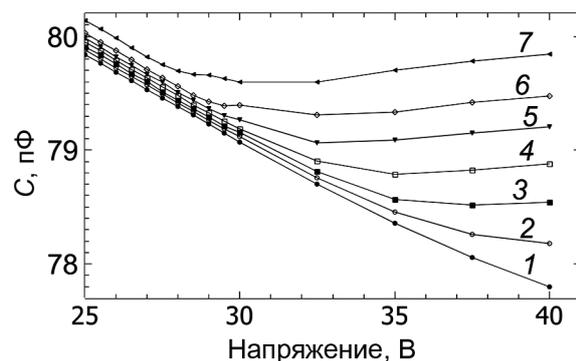


Рис. 3. Фрагменты ВФХ МДП-структуры № 1 с диэлектриком SiO<sub>2</sub>, измеренные на частоте 50 кГц при прямой развертке напряжения при различных температурах, К: кр. 1 – 100; кр. 2 – 111; кр. 3 – 119; кр. 4 – 128; кр. 5 – 137; кр. 6 – 147; кр. 7 – 170

Из рис. 3 видно, что при снижении температуры концентрации электронов становится недостаточно для формирования инверсионного слоя, что приводит к исчезновению участка насыщения (емкость продолжает уменьшаться при увеличении положительного смещения). Для МДП-структур с двухслойным диэлектриком SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> насыщение емкости, связанное с формированием

инверсионного слоя, исчезает при охлаждении структуры до 260 К. ВФХ МДП-структуры № 2 при температуре 300 К приведена на рис. 4, на котором также показана релаксация емкости при подаче импульсного смещения, переводящего структуру в режим неравновесного обеднения. Видно, что время релаксации неравновесного обеднения составляет около 10 с. Для МДП-структур с диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  наблюдался гистерезис ВФХ на величину около 2.5 В, который можно объяснить наличием на границе раздела медленных поверхностных состояний с плотностью  $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Из рис. 5, где приведены температурные зависимости емкости и последовательного сопротивления  $R_S$ , зависящего от сопротивления контакта и сопротивления пленки пентацена, для МДП-структуры № 1, измеренные при различных напряжениях, видно, что емкость при охлаждении уменьшается при любых напряжениях, а участок спада при температурах 100–150 К для напряжения 40 В связан с исчезновением инверсионного слоя при охлаждении. Выражение для последовательного сопротивления можно записать в следующем виде:

$$R_S = R_C + \frac{R_B}{1 + \omega^2 R_B^2 C_B^2}.$$

Сопротивление и емкость объема органической пленки пентацена зависят от ширины слоя обеднения ( $w_D$ ) [11, 28]:

$$C_B = \epsilon_S \epsilon_0 \frac{S}{d_S - w_D}, \quad R_B = \sigma_S^{-1} \frac{d_S - w_D}{S},$$

где  $\sigma_S$  – проводимость органической пленки. Максимальную толщину обедненного слоя в сильной инверсии, когда происходит насыщение измеряемой емкости на уровне  $C_{\text{мин}}$ , можно оценить по формуле

$$w_D = \frac{\epsilon_S \epsilon_0 S}{C_D}, \quad C_D = \frac{C_i C_{\text{мин}}}{C_i - C_{\text{мин}}}.$$

Для разных образцов максимальная толщина области обеднения изменялась от 13 до 21 нм. Значения  $R_S$  незначительно различаются в обогащении и сильной инверсии, поэтому значение этого сопротивления определяется, прежде всего, значением сопротивления контакта золото – пентацен, которое для структуры № 1 близко к 1550 Ом (при 300 К). По разнице сопротивления  $R_S$  в обогащении и инверсии возможно оценить проводимость пленки пентацена и подвижность дырок, но для исследования подвижности существуют более точные и информативные методы (например, переходной электролюминесценции [29]).

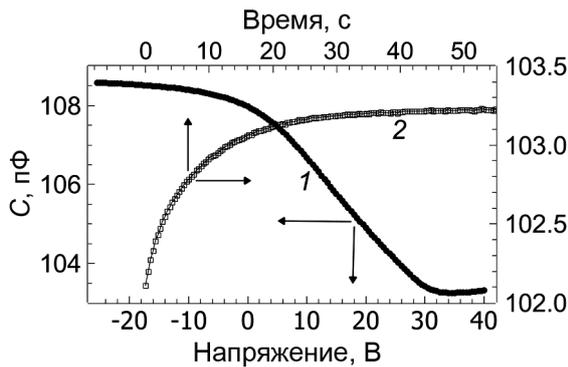


Рис. 4. ВФХ (кр. 1) и зависимость емкости от времени (кр. 2) после подачи импульса напряжения от 0 до 40 В для МДП-структуры № 2 с диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ , измеренные на частоте 200 кГц при температуре 300 К

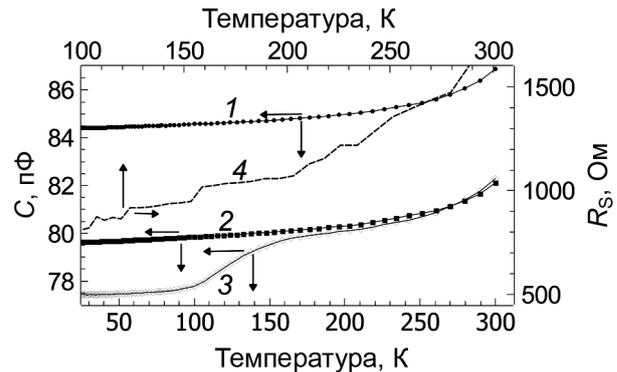


Рис. 5. Зависимости емкости (кр. 1–3) и последовательного сопротивления  $R_S$  (кр. 4) МДП-структуры № 1 с диэлектриком  $\text{SiO}_2$ , измеренные на частоте 100 кГц при прямой развертке напряжения при различных напряжениях смещения, В: кр. 1, 4 – 25; кр. 2 – 25; кр. 3 – 40

Следует отметить, что значения сопротивления контакта золото – пентацен зависят от технологических режимов и условий хранения. При исследованиях различных МДП-структур определенные значения сопротивления контакта для различных образцов при 300 К находились в диапазоне от 170 до 1550 Ом, что согласуется с результатами работы [27].

Концентрацию дырок в пленке пентацена можно определить по наклону зависимости  $C^{-2}(V)$  в режиме обеднения, где  $V$  – напряжение смещения (анализ Мотта – Шоттки) [3]. В приближении обеднения верно соотношение

$$\frac{\partial C^{-2}}{\partial V} = \frac{2}{q\epsilon_S\epsilon_0 N_A S^2},$$

где  $N_A$  – концентрация ионизованной акцепторной примеси;  $q$  – заряд электрона. Для исследованных образцов зависимость  $C^{-2}(V)$  в обеднении хорошо аппроксимировалась линейной функцией (погрешность аппроксимации менее 1 %), что позволило найти концентрации дырок в различных условиях. Для образцов со слоем SiO<sub>2</sub> концентрация дырок находилась в диапазоне  $(1.25\text{--}1.29)\cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, а для структур с двухслойным диэлектриком SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – в диапазоне  $(1.01\text{--}1.05)\cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Концентрации дырок, найденные в рамках анализа Мотта – Шоттки, оставались неизменными в диапазоне температур от 8 до 250 К, при нагреве до 300 К концентрация для части образцов снижалась менее чем на 10 %, что может быть связано с нарушением приближения аппроксимации. Определяемая концентрация дырок практически не зависела от частоты измерения ВФХ в диапазоне 10 кГц – 1 МГц. В работах [30, 31] ставится под сомнение возможность использования анализа Мотта – Шоттки для определения концентрации в тонких пленках органических полупроводников, поскольку емкостные характеристики могут определяться инжекцией носителей заряда из обратного контакта. Для исследованных образцов инжекция из контакта не является доминирующим процессом, поскольку не наблюдается частотная и температурная дисперсия ВФХ, толщина слоя обеднения меньше толщины органической пленки, а определяемые значения концентрации дырок оказались близкими при различных значениях сопротивлений контакта. Найденные значения концентрации дырок в пентаcene можно объяснить в рамках представлений о ненамеренном легировании органических пленок [32, 33].

Из рис. 6, где приведены частотные зависимости емкости и приведенной проводимости  $L_p$  МДП-структуры с диэлектриком SiO<sub>2</sub> при различных напряжениях, видно, что расчет при помощи метода эквивалентных схем позволяет качественно описать экспериментальные зависимости. Емкость МДП-структур на основе пентацена слабо уменьшается при увеличении частоты от 1 до 200 кГц, а затем значительно снижается из-за действия последовательного сопротивления контакта [34]. На рис. 7 показаны частотные зависимости проводимости  $L$  МДП-структур с диэлектриками SiO<sub>2</sub> и Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, измеренные в режиме обогащения при температуре 300 К.

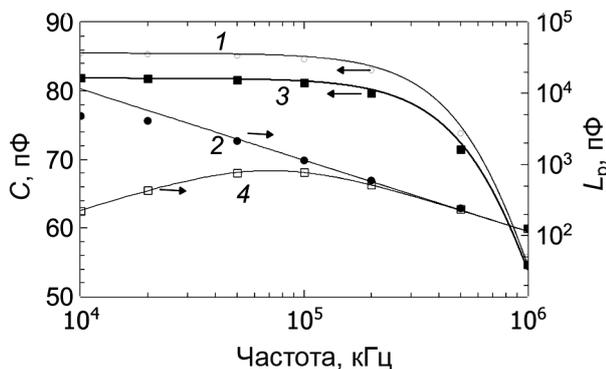


Рис. 6. Экспериментальные зависимости емкости (кр. 1, 2) и проводимости  $L_p$  (кр. 3, 4) МДП-структуры № 1 с диэлектриком SiO<sub>2</sub> от частоты, измеренные при напряжениях –5 (кр. 1, 3) и 20 В (кр. 2, 4) и температуре 250 К (точки), а также результаты моделирования при сопротивлении контакта 1350 Ом и проводимости пленки пентацена  $2.35\cdot 10^{-3}$  См/м (линии)

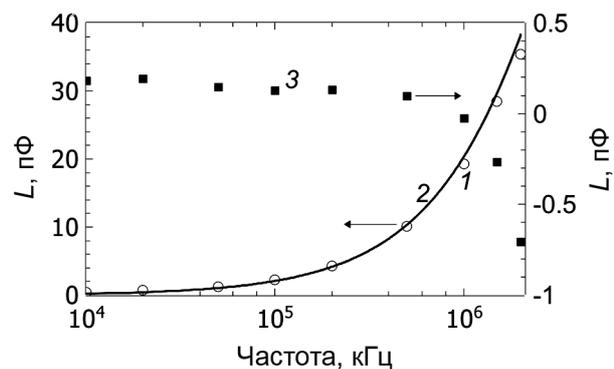


Рис. 7. Экспериментальные зависимости проводимости  $L$  МДП-структур с диэлектриком SiO<sub>2</sub> (кр. 1) и Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (кр. 3), измеренные при температуре 300 К и напряжении –25 В (точки), а также результаты моделирования частотной зависимости проводимости для МДП-структуры с диэлектриком SiO<sub>2</sub> (кр. 2, линия)

Из рис. 7 видно, что экспериментальная частотная зависимость проводимости МДП-структуры с диэлектриком SiO<sub>2</sub> достаточно хорошо согласуется с результатами моделирования. Частотную зависимость проводимости МДП-структуры с двухслойным диэлектриком SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не уда-

ется адекватно описать при помощи предложенной эквивалентной схемы. Проводимость этой структуры принимает малые положительные значения в диапазоне частот 10–500 кГц, а при больших частотах проводимость МДП-структуры с диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  становится отрицательной. Выяснение механизмов формирования зависимостей адмиттанса МДП-структур с диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  требует проведения дальнейших исследований. Ранее было теоретически показано, что слои  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  могут обладать отрицательной дифференциальной проводимостью из-за особенностей механизмов рассеяния носителей заряда, приводящих к немонотонной зависимости дрейфовой скорости от величины электрического поля [35, 36]. При низких температурах (менее 50 К) проводимость МДП-структур с диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  становится положительной во всем частотном диапазоне (1 кГц – 2 МГц).

Из рис. 8, где приведены температурные зависимости проводимости  $L_p$  МДП-структуры № 2, измеренные на частоте 100 кГц при различных напряжениях смещения, видно, что на температурной зависимости наблюдаются два максимума, амплитуда которых уменьшается при смещении структур из обогащения в обеднение. Такие максимумы на температурной зависимости проводимости могут быть связаны с наличием в объеме пентацена высокой концентрации ловушек двух типов (с различными энергиями). При наблюдаемой зависимости амплитуды максимумов проводимости от напряжения менее вероятно существование на границе раздела диэлектрик – органическая пленка двух дискретных уровней поверхностных состояний с высокой плотностью. Кроме этого, перезарядка поверхностных состояний с высокой плотностью приводит к появлению максимума в режиме обеднения на зависимости проводимости  $L_p$  от напряжения [3]. На рис. 9 приведены зависимости емкости и проводимости  $L_p$  от напряжения для МДП-структуры с диэлектриком  $\text{SiO}_2$  (другой образец, при создании которого была нарушена технология очистки поверхности подложки перед нанесением пентацена). Из рис. 9 видно, что для этого образца поверхностные состояния приводят к появлению особенностей на ВФХ и зависимости проводимости от напряжения в режиме обеднения.

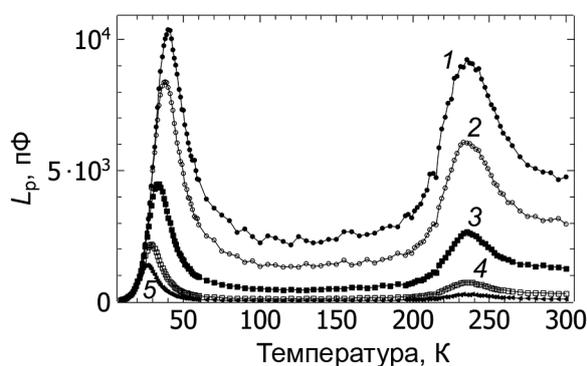


Рис. 8. Экспериментальные зависимости проводимости  $L_p$  МДП-структуры № 2 с диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  от температуры, измеренные на частоте 100 кГц при различных напряжениях смещения, В: кр. 1 – 20; кр. 2 – 10; кр. 3 – 0; кр. 4 – 10; кр. 5 – 20

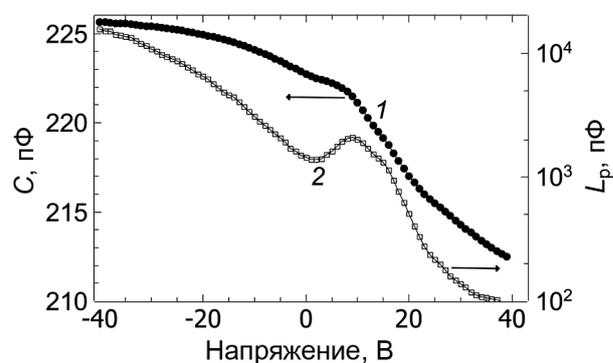


Рис. 9. Экспериментальные зависимости емкости (кр. 1) и проводимости  $L_p$  (кр. 2) МДП-структуры с диэлектриком  $\text{SiO}_2$  от напряжения, измеренные при температуре 300 К и частоте 100 кГц

Для МДП-структуры № 1 с диэлектриком  $\text{SiO}_2$  был обнаружен низкотемпературный максимум на температурной зависимости проводимости  $L_p$ . Амплитуда этого максимума уменьшается при увеличении обедняющего напряжения на структуре. Следует отметить, что в режиме обогащения максимум менее нагляден из-за больших значений проводимости при температурах, превышающих 30 К. Из рис. 10, где приведены температурные зависимости проводимости  $L_p$  в области максимума, измеренные на разных частотах, видно, что при увеличении частоты максимум смещается в более высокотемпературную область. На рис. 11 показаны частотные зависимости проводимости  $L_p$ , измеренные при разных температурах в диапазоне от 13 до 29 К. Из рис. 11 видно, что при нагреве максимум смещается в область больших частот.

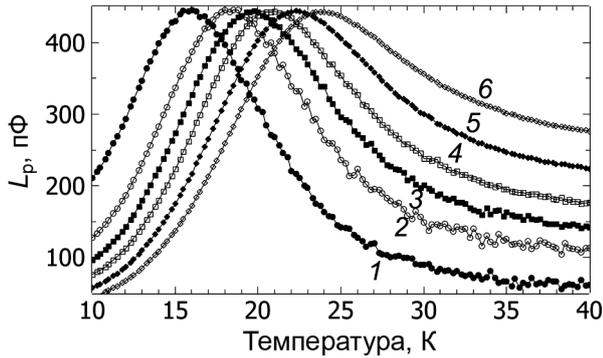


Рис. 10. Экспериментальные зависимости проводимости  $L_p$  МДП-структуры № 1 с диэлектриком SiO<sub>2</sub> от температуры, измеренные при напряжении  $-40$  В при различных частотах, кГц: кр. 1 – 14; кр. 2 – 24; кр. 3 – 32; кр. 4 – 41; кр. 5 – 54; кр. 6 – 70

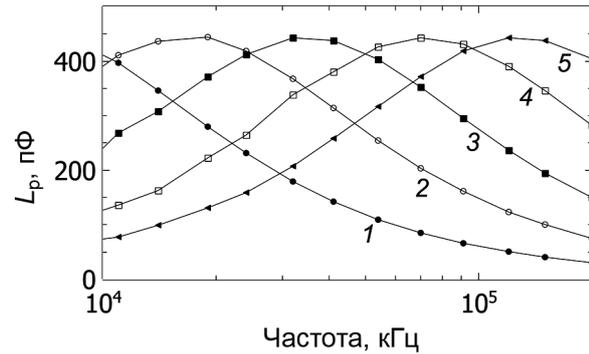


Рис. 11. Экспериментальные зависимости проводимости  $L_p$  МДП-структуры № 1 с диэлектриком SiO<sub>2</sub> от частоты, измеренные при напряжении  $-40$  В при различных температурах, К: кр. 1 – 13; кр. 2 – 16; кр. 3 – 20; кр. 4 – 24; кр. 5 – 29

Для исследованных МДП-структур с диэлектриками SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были построены графики Аррениуса и определены энергии активации объемных ловушек. Исследования частотных зависимостей проводимости позволили (в рамках модели дискретного уровня) найти концентрации и времена перезарядки ловушек в объеме органической пленки. Для МДП-структуры с диэлектриком SiO<sub>2</sub> уровень ловушек находится на 3 мэВ выше потолка валентной зоны, имеет концентрацию  $1.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , время перезарядки при 18 К составляет около 6 мкс. В МДП-структуре № 2 с двухслойным диэлектриком Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обнаружен мелкий уровень с энергией активации 6–7 мэВ, концентрацией  $2.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и временем перезарядки 1.6 мкс (при 30 К). Более глубокий уровень имел энергию активации 570–660 мэВ, концентрацию  $2.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и время перезарядки 1.06 мкс (при 226 К).

Выявлена связь типа использованной подложки (SiO<sub>2</sub> или SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) с электрофизическими свойствами пленки пентацена (концентрацией дырок, скоростью формирования инверсионного слоя, параметрами объемных ловушек). Ранее отмечалось, что тип использованной подложки является одним из основных факторов, определяющих свойства пленок пентацена [37, 38].

### Выводы

Таким образом, экспериментально исследованы электрофизические свойства МДП-структур на основе пленки пентацена с диэлектрическими слоями SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при помощи измерений адмиттанса в широком диапазоне условий. Установлено, что при температурах, близких к комнатной, в изготовленных структурах минимальное значение емкости на ВФХ определяется образованием инверсионного слоя, а полного обеднения пленки пентацена не происходит (толщина слоя обеднения меньше толщины органической пленки). Время образования инверсионного слоя при 300 К составляет около 10 с. При охлаждении структур до 260 К (в случае SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) или до 100 К (в случае SiO<sub>2</sub>) инверсионный слой не успевает образоваться и возникает режим, сходный с неравновесным обеднением. Гистерезис ВФХ отсутствует в случае использования однослойного SiO<sub>2</sub> и относительно невелик (около 2.5 В) при нанесении пентацена на двухслойную подложку SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При низких температурах (менее 50 К) для всех исследованных структур на ВФХ возникла особенность в виде небольшого провала при малых напряжениях, причины которой остаются дискуссионными.

ВФХ в режиме обеднения хорошо спрямляются в координатах  $C^{-2}$  и  $V$ , что позволяет применить анализ Мотта – Шоттки для определения концентрации дырок в органической пленке. Для МДП-структур с диэлектриком SiO<sub>2</sub> определенные концентрации дырок близки к  $1.27 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а для образцов с SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – к  $1.03 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Концентрации дырок, определенные из емкостных измерений, постоянны в широком диапазоне условий, что свидетельствует о незначительной роли инжекции из контакта в формировании ВФХ. Большие значения найденных концентраций дырок можно объяснить в рамках представлений о ненамеренном легировании органических пленок.

Показано, что частотные зависимости приведенной проводимости МДП-структур с диэлектриком  $\text{SiO}_2$  достаточно хорошо описываются в рамках предложенной эквивалентной схемы, а для структур с двухслойным диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  наблюдается отрицательная дифференциальная проводимость при частотах 1–2 МГц, что может быть связано с особенностями рассеяния в слоях  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . Последовательное сопротивление структуры определяется сопротивлением контакта золото – пентацен, значение которого зависит от технологии и условий хранения образцов и для исследованных структур изменялось от 170 до 1550 Ом при комнатной температуре. Сопротивление контакта приводит к значительному уменьшению измеряемой емкости при частотах, превышающих 1 МГц.

Впервые показана высокая информативность низкотемпературных измерений адмиттанса при исследовании параметров ловушек в объеме пентацена. Для МДП-структур с диэлектриком  $\text{SiO}_2$  обнаружен уровень ловушек с концентрацией  $1.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и энергией активации около 3 мэВ. Для образцов с двухслойной подложкой  $\text{SiO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$  обнаружено два ловушечных уровня с концентрациями  $2.3 \cdot 10^{18}$  и  $2.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при энергиях активации 6–7 и 570–660 мэВ соответственно.

Таким образом, электрофизические свойства пленок пентацена (концентрации дырок, параметры объемных ловушек, скорость генерации электронов) зависят от типа использованной подложки. Изготовленные структуры характеризуются достаточно качественной границей раздела неорганический диэлектрик – органическая пленка, что проявляется в небольшом гистерезисе ВФХ и невысокой плотности быстрых поверхностных состояний (согласно оценкам, менее  $2 \cdot 10^{11} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ ). Для пленки пентацена характерны высокие концентрации дырок и объемных ловушек.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun S.S. and Dalton L.R. Introduction to Organic Electronic and Optoelectronic materials and Devices. – Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2016. – 963 p.
2. Stallinga P. Electrical Characterization of Organic Electronic Materials and Devices. – Chichester et al.: John Wiley & Sons, 2009. – 316 p.
3. Nicollian E.H. and Brews J.R. MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology. – New York et al.: Wiley, 1982. – 906 p.
4. Sandberg O.J., Nyman M., Dahlström S., et al. // Appl. Phys. Lett. – 2017. – V. 110. – No. 15. – P. 153504.
5. Larsen A., Dahal E., Paluba J., et al. // Org. Electron. – 2018. – V. 62. – P. 660-666.
6. Noma T., Taguchi D., Manaka T., et al. // Org. Electron. – 2017. – V. 43. – P. 70-76.
7. Yang Y.S., Kim S.H., Lee J.I., et al. // Appl. Phys. Lett. – 2002. – V. 80. – No. 9. – P. 1595–1597.
8. Alves N. and Taylor D.M. // Appl. Phys. Lett. – 2008. – V. 92. – No. 10. – P. 92.
9. Torres I. and Taylor D.M. // J. Appl. Phys. – 2005. – V. 98. – No. 7. – P. 073710.
10. Estrada M., Ulloa F., Ávila M., et al. // IEEE Trans. Electron Dev. – 2013. – V. 60. – No. 6. – P. 2057–2063.
11. Hirwa H., Pittner S., and Wagner V. // Org. Electron. – 2015. – V. 24. – P. 303–314.
12. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 4. – С. 102–109.
13. Izhnin I.I., Nsmelov S.N., Dzyadukh S.M., et al. // Nanoscale Res. Lett. – 2016. – V. 11. – P. 53.
14. Juhász P., Vary M., Stuchlikova L., et al. // Org. Electron. – 2015. – V. 17. – P. 240–246.
15. Zhang J.W., He Y., Chen X.Q., et al. // Org. Electron. – 2015. – V. 21. – P. 73–77.
16. Nelson S.F., Lin Y.Y., Gundlach D.J., et al. // Appl. Phys. Lett. – 1998. – V. 72. – No. 15. – P. 1854–1856.
17. Ma Y.X., Han C.Y., Tang W.M., et al. // Appl. Phys. Lett. – 2017. – V. 111. – P. 023501.
18. Pazos-Outón L.M., Lee J.M., Futscher M.H., et al. // ACS Energy Lett. – 2017. – V. 2. – P. 476–480.
19. Lin Y.J. and Hung C.C. // Microelectron. Rel. – 2018. – V. 81. – P. 90–94.
20. Han C.Y., Tang W.M., Leung C.H., et al. // IEEE Trans. Electron Dev. – 2015. – V. 62. – No. 7. – P. 2313–2319.
21. Wang W., Shi X., Li X., et al. // IEEE Electron Dev. Lett. – 2016. – V. 37. – No. 10. – P. 1332–1335.
22. Orgiu E., Locci S., Fraboni B., et al. // Org. Electron. – 2011. – V. 12. – P. 477–485.
23. Pearton S.J., Yang J., Cary IV P.H., et al. // Appl. Phys. Rev. – 2018. – V. 5. – P. 011301.
24. Lee C.T., Lee H.Y., and Chen H.W. // IEEE Electron Dev. Lett. – 2003. – V. 24. – No. 2. – P. 54–56.
25. Калыгина В.М., Зарубин А.Н., Найден Е.П. и др. // ФТП. – 2011. – Т. 45. – № 8. – С. 1130–1135.
26. Bezeccheri E., Femia A., Liguori R., et al. // Mater. Today: Proc. – 2017. – V. 4. – No. 4. – P. 5045–5052.
27. Liguori R. A Study on Defects in Organic Semiconductors for Field Effect Transistors. – Tesi di Dottorato, 2014. – 143 p.

28. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядх С.М. // Изв. вузов. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 11. – С. 162–169.
29. Романов И.В., Войцеховский А.В., Дегтяренко К.М. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 11. – С. 116–123.
30. Nigam A., Premaratne M., and Nair P.R. // Org. Electron. – 2013. – V. 14. – P. 2902–2907.
31. Nigam A., Nair P.R., Premaratne M., et al. // IEEE Electron Dev. Lett. – 2014. – V. 35. – No. 5. – P. 581–583.
32. Sleiman A., Rosamond M.C., Alba Martin M., et al. // Appl. Phys. Lett. – 2012. – V. 100. – No. 2. – P. 14.
33. Benor A., Hoppe A., Wagner V., et al. // Org. Electron. – 2007. – V. 8. – P. 749–758.
34. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядх С.М. // Изв. вузов. Физика. – 2005. – Т. 48. – № 6. – С. 31–37.
35. Ghosh K. and Singiseti U. // Appl. Phys. Lett. – 2016. – V. 109. – P. 072102.
36. Ghosh K. and Singiseti U. // J. Appl. Phys. – 2017. – V. 122. – No. 3. – P. 035702.
37. Ruiz R., Choudhary D., Nickel B., et al. // Chem. Mater. – 2004. – V. 16. – P. 4497–4508.
38. Klauk H., Halik M., Zschieschang U., et al. // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 82. – P. 4175–4177.

Поступила в редакцию 03.10.18.

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова  
Томского государственного университета, г. Томск, Россия

**Новиков** Вадим Александрович, к.ф.-м.н., доцент, e-mail: novikovvadim@mail.ru;

**Войцеховский** Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой НИ ТГУ, зав. лабораторией СФТИ ТГУ,  
e-mail: vav43@mail.tsu.ru;

**Несмелов** Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: nesm69@mail.ru;

**Дзядх** Станислав Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: bonespirit@mail2000.ru;

**Копылова** Татьяна Николаевна, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией, e-mail: kopylova@phys.tsu.ru;

**Дегтяренко** Константин Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: norma1954@yandex.ru;

**Черников** Евгений Викторович, инженер-исследователь, e-mail: evvch192184@gmail.com;

**Калыгина** Вера Михайловна, к.ф.-м.н., доцент, e-mail: kalygina@ngs.ru.