Национальный исследовательский
Томский государственный университет

Радиофизический факультет

8-я Международная научно-практическая конференция

Актуальные проблемы радиофизики АПР 2019

Сборник трудов конференции

РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-4 октября 2019 года
г. Томск

Адмиттанс многослойных органо-неорганических систем на основе пентацена в широком диапазоне температур

Дзядух С.М.
Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Копылова Т.Н., Новиков В.А., Дегтяренко К.М.
Томский государственный университет
E-mail:vav43@mail.tsu.ru

Совмещение приборов на основе органических тонких пленок (например, органических светодиодов, транзисторов, фотоэлементов) с элементами неорганической полупроводниковой электроники перспективно при разработке относительно недорогих устройств, обладающих принципиально новыми функциональными возможностями [1]. Для достижения этой цели необходимо комплексное изучение физических и химических процессов в многослойных органо-неорганических системах, что возможно при развитии традиционных экспериментальных методов с учетом особенностей новых объектов исследования. Одним из распространенных и информативных методов, уже хорошо зарекомендовавших себя при изучении многослойных структур на основе органических полупроводников, является метод адмиттанса [2]. Измерения зависимостей адмиттанса от частоты и напряжения позволяют получить важную информацию о процессах в органических пленках, а также на границах раздела между диэлектриками и органическими полупроводниками [3, 4]. В докладе приводятся результаты экспериментальных исследований частотных, температурных и полевых зависимостей адмиттанса МДП-структур на основе пентацена с разными диэлектриками (SiO_2 и SiO_2/Ga_2O_3).

Для исследований создавались МДП-структуры на основе распространенного органического полупроводника – пентацена. Изготавливались МДП-структуры двух типов с различными диэлектрическими покрытиями: однослойным SiO_2 (структуры № 1) и двухслойным SiO_2/Ga_2O_3 (№ 2). Использовались подложки из высоколегированного *n*-Si с нанесенными сверху слоями SiO_2, причем толщина диэлектрического покрытия изменялась от 220 до 260 нм. Для структур № 2 сверху слоя SiO_2 при помощи магнетронного распыления наносился слой Ga_2O_3, толщина которого для разных образцов изменялась от 190 до 240 нм. Аморфные пленки Ga_2O_3 переводились в β-фазу посредством отжига при температуре 900 ºС. Последующая обработка в кислородной плазме применялась для насыщения вакансий кислорода в пленке Ga_2O_3. После очистки поверхности подложек путем промывания в изопропиловом спирте и обработки в кислородной плазме методом термовакуумного напыления наносился слой пентацена с толщиной около 50 нм. Затем при помощи термического вакуумного напыления формировались золотые контакты, причем для каждой структуры площадь электродов определялась при помощи специальной микроскопической методики. Для создания омических контактов к высоколегированному кремнию проводилось вплавление индия посредством метода электрического пробоя. В зависимости от использованной при напылении маски площади золотых контактов изменялись от 0.68 до 1.09 мм^2. Измерения проводились при помощи автоматизированной установки для спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на основе измерителя иммитанса Agilent E4980A и неоптического криостата Janis. Установка позволяла измерять зависимости адмиттанса от напряжения смещения, которое может изменяться от -30 до 30 В, а также от частоты тестового сигнала (500 Гц – 2 МГц) и от температуры (8 – 300 К). Прямым направлением развертки напряжения принято изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а обратным – от положительных к отрицательным.

Экспериментально изучены электрофизические свойства МДП-структур на основе пентацена с диэлектрическими покрытиями SiO_2 и SiO_2/Ga_2O_3 при помощи измерений адмиттанса в широком диапазоне напряжений, частот и температур. Показано, что в исследованных МДП-структурах минимальное значение емкости на вольт-фарадной характеристике (ВФХ) достигается при положительном смещении на контакте из Au. При достаточно высоких температурах (вблизи 300 К) в пентацене при положительных смещениях не возникает режим полного обеднения органической пленки – толщина слоя обеднения меньше толщины слоя пентацена. В этом случае минимальное значение емкости определяется формированием инверсионного слоя вблизи границы органического полупроводника с диэлектриком. При комнатной температуре время образования инверсионного слоя близко к десяти секундам. При охлаждении образцов скорость поступления неосновных носителей в инверсионный слой уменьшается, что приводит к реализации в приповерхностной области пентацена режима, сходного с неравновесным обеднением, и проявляется исчезновением участка насыщения емкости при положительных смещениях (*рис.1*). Скорость поступления электронов в инверсионный слой зависит от использованной подложки, поскольку переход к неравновесным ВФХ для структур № 1 и 2 происходит при температуре 100 и 260 К, соответственно. Для структур № 1 (SiO_2) гистерезис зависимостей адмиттанса от напряжения смещения отсутствует, а для структур № 2 (SiO_2/Ga_2O_3) – сдвиг ВФХ по оси напряжения при прямой и обратной развертке не превышает 2-3 В (при изменении смещения в диапазоне от -25 до 40 В).

Зависимости емкости МДП-структур (C) от напряжения смещения (V) в режиме обеднения спрямляются в координатах C^{-2} и V. Концентрация дырок в приповерхностном слое пентацена определялась при помощи анализа Мотта-Шоттки. Для структур № 1 и 2 концентрации дырок в приповерхностном слое органической пленки составили около к 1.3×10^{18} и 1.0×10^{18} см$^{-3}$, соответственно. Построенные зависимости концентрации дырок от температуры и частоты позволяют утверждать, что концентрации дырок, найденные из измерений адмиттанса, неизменны в широком диапазоне условий. Этот результат свидетельствует о незначительном вкладе инжекции из контакта в формирование ВФХ, что противоречит предположениям, сделанным в работе [5]. Определенные концентрации дырок велики для нелегированного органического полупроводника, такие значения концентраций можно объяснить ненамеренным легированием пентацена [6].

Установлено, что зависимости приведенной проводимости ($L_p=G_p/\omega$) МДП-структур № 1 (SiO_2) хорошо согласуются с результатами моделирования в рамках метода эквивалентных схем [7], а для структур № 2 (SiO_2/Ga_2O_3) обнаружен эффект возникновения отрицательной дифференциальной проводимости при высоких частотах (1-2 МГц). Этот эффект может быть обусловлен особенностями рассеяния в слоях Ga_2O_3 [8]. Значение последовательного сопротивления структуры, которое обусловлено сопротивлением контакта между золотом и пентаценом, зависит от использованной подложки и условий хранения структур. Для изученных образцов значение этого сопротивления составляло от 170 до 1550 Ом (при температуре 300 К), наличие последовательного сопротивления приводило к заметному уменьшению значений измеряемой емкости на высоких частотах (>1 МГц). Впервые показано, что низкотемпературные измерения адмиттанса МДП-структур могут использоваться при исследованиях параметров ловушек в объеме органического полупроводника. Для МДП-структур № 1 (SiO_2) выявлены максимумы проводимости (*рис.2*), связанные с мелким уровнем ловушек в объеме пентацена (энергия активации составила около 3 мэВ, а концентрация – примерно 1.4×10^{18} см$^{-3}$). Для структур № 2 (SiO_2/Ga_2O_3) обнаружено два уровня ловушек с концентрациями 2.3×10^{18} и 2.0×10^{18} см$^{-3}$ при энергиях активации 6-7 и 570-660 мэВ, соответственно.

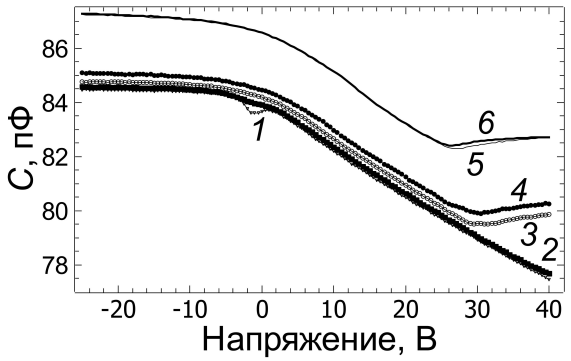


Рис.1 ВФХ МДП-структуры №1, измеренные на частоте 50кГц при прямой (кр. 1–5) и обратной (кр. 6) развертке напряжения при разных температурах, К: кр.1 – 30, кр.2 – 77, кр.3 – 150, кр.4 – 200, кр.5,6 – 300

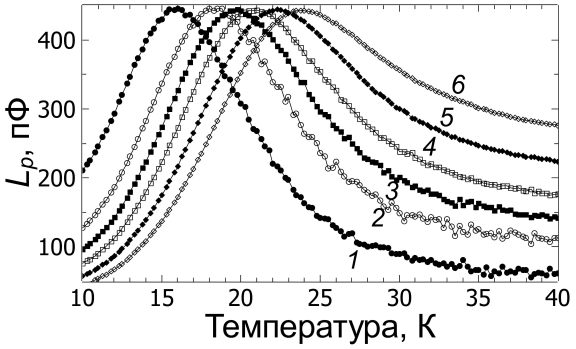


Рис.2 Экспериментальные зависимости проводимости L_p МДП-структуры №1 от температуры, измеренные при напряжении 40 В при разных частотах, кГц: кр.1 – 14, кр.2 – 24, кр.3 – 32, кр.4 – 41, кр.5 – 54, кр.6 – 70

Показано, что тип использованной подложки существенно влияет на основные электрофизические свойства исследованных пленок пентацена (концентрации дырок, параметры объемных ловушек, скорости генерации электронов). Изученные органо-неорганические системы обладают достаточно качественной границей раздела между неорганическим диэлектрическим покрытием и пленкой органического полупроводника, поскольку гистерезис электрофизических характеристик мал (или отсутствует), плотность быстрых поверхностных состояний невелика (менее 2×10^{11} эВ$^{-1}$см$^{-2}$). Для исследованных пленок пентацена определены высокие концентрации дырок, а также ловушек в объеме органического полупроводника.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта р_а № 18–43–700005.

Список публикаций:

[1] Logothetidis S. // Mater Sci Engin: B. 2008. V. 152. No. 1-3. P. 96.
[2] Stallinga P. Electrical characterization of organic electronic materials and devices. Chichester: John Wiley & Sons. 2009. 316 p.
[3] Hirwa H., Pittner S., Wagner V. // Org Electron. 2015. V. 24. P. 303.
[4] Alves N., Taylor D. M. // Appl Phys Lett. 2008. V. 92. No. 10. P. 92.
[5] Nigam A., Premaratne M., Nair P. R. // Org Electron. 2013. V. 14. P. 2902.
[6] Sleiman A., Rosamond M. C., Alba Martin M., et al. // Appl Phys Lett. 2012. V. 100. No. 2. P. 14.
[7] Новиков В.А., Войцеховский А.В., Несмелов С.Н. // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 1. С. 79.
[8] Ghosh K., Singisetti U. // Appl Phys Lett. 2016. V. 109. P. 072102.