

13,18

Формирование вертикального графена на поверхности арсенид-галлиевых структур

© Б.Н. Звонков¹, И.Н. Антонов¹, О.В. Вихрова^{1,¶}, Ю.А. Данилов¹, М.В. Дорохин¹,
Н.В. Дикарева¹, А.В. Нежданов¹, М.П. Темиряева²

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино Московск. обл., Россия

¶ E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

Поступила в Редакцию 24 января 2023 г.

В окончательной редакции 24 января 2023 г.

Принята к публикации 1 февраля 2023 г.

Изучены свойства углеродных слоев (С-слоев), сформированных термическим разложением CCl_4 при температурах 600–700°C на поверхности арсенид-галлиевых структур, изготовленных методом МОС-гидридной эпитаксии на пластинах n^+ -GaAs(100). Морфология поверхности С-слоев исследована с использованием атомно-силовой микроскопии. Структурные и оптические свойства изучены с применением спектроскопии комбинационного рассеяния света и спектроскопии отражения. Обнаружено, что в случае С-слоя, изготовленного при температуре 650–700°C, изображение атомно-силовой микроскопии демонстрирует наличие вертикальных углеродных наностенок (вертикального графена), расположенных параллельно одному из направлений [110] кристаллической решетки GaAs. Характеристики полос, наблюдаемых в спектрах комбинационного рассеяния света, соответствуют параметрам спектров вертикального графена. Коэффициент отражения таких углеродных слоев существенно уменьшается (диффузное отражение не превышает 25% для слоя, изготовленного при 700°C) в диапазоне длин волн от 0.19 до 1.8 μm . Наличие значительной „поглощательной“ способности делает полученные углеродные слои перспективными в качестве проводящего контакта в приборных фоточувствительных полупроводниковых структурах, что подтверждается предварительными результатами исследований вольтамперных характеристик и спектральных зависимостей фототока.

Ключевые слова: термическое разложение четыреххлористого углерода, арсенид галлия, морфология вертикального графена.

DOI: 10.21883/FTT.2023.04.55307.9

1. Введение

Среди исследований различных структур на основе графена, наследующих некоторые замечательные параметры этого материала (в частности, механическую прочность и гибкость, развитую удельную поверхность), в последние годы появился ряд работ по получению, изучению свойств и применению вертикального графена (ВГ) [1]. По существу, под вертикальным графеном понимают массив вертикально ориентированных пространственно разделенных углеродных нанолayers различной формы, имеющих толщину в несколько графеновых слоев с характерным межслойным расстоянием порядка 0.34 nm [2]. По сравнению с обычными пленками графена (в том числе, и многослойного графена) вертикальный графен имеет развитую морфологию, острые края, большое отношение поверхности к объему. Эти особенности вертикального графена обуславливают перспективы его применения в качестве полевых эмиттеров, датчиков газа и биосенсоров, солнечных элементов и др. [3,4].

Согласно публикациям (см. обзоры [1,5]), практически единственным методом создания структур вертикального графена считается метод химического осаждения из газовой фазы, усиленного плазмой (PECVD). При этом плазма может быть создана разными способами [5], например, с помощью СВЧ (обычно около 2.45 GHz) или ВЧ источника (13.56 MHz). Исследованы зависимости параметров выращенных таким способом структур ВГ от режимов их получения [6]. Однако воздействие плазмы на поверхность подложек в процессе осаждения может иметь негативные последствия для полупроводниковых структур. Поэтому поиск альтернативных методов формирования ВГ, в первую очередь на поверхности таких материалов как, например, GaAs, представляет научный и практический интерес.

В настоящей работе углеродный графеноподобный слой, содержащий вертикальные наностенки (вертикальный графен), сформирован на поверхности арсенид-галлиевой квантово-размерной структуры методом термического разложения четыреххлористого углерода в потоке водорода. С целью приборных применений изу-

ченны морфология, структурные, оптические и электрические свойства изготовленных образцов.

2. Методика эксперимента

Структуры с углеродным слоем на поверхности изготавливались на пластинах n^+ -GaAs(100) в реакторе МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) при атмосферном давлении. Последовательно были выращены при температуре $T_g = 600\text{--}650^\circ\text{C}$ буферный слой n -GaAs (легированный Si до концентрации не более 10^{17} cm^{-3}) толщиной $\sim 0.5\ \mu\text{m}$, квантовая яма InGaAs (толщиной 8–10 nm с содержанием In $x \sim 0.12$) и нелегированный покровный слой GaAs толщиной 20 или 50 nm. Далее методом термического разложения CCl_4 формировалась углеродная пленка [7]. Данный метод позволяет получать углеродные пленки в том же реакторе, в котором реализуется эпитаксиальное выращивание полупроводниковых слоев, поэтому создание С-слоя может быть встроено в процесс изготовления приборной полупроводниковой структуры. При изготовлении углеродной пленки варьировались температура процесса (T_{gC}) от 600 до 700°C и содержание CCl_4 в потоке водорода. В табл. 1 приведено краткое технологическое описание изготовленных арсенид-галлиевых структур с углеродным слоем на поверхности. Исследования комбинационного рассеяния света (КРС) углеродных пленок проводились на установке NTEGRA SPECTRA (NT-MDT) при комнатной температуре в геометрии обратного рассеяния с использованием лазера с длиной волны 473 nm. Излучение фокусировалось $100\times$ объективом с апертурой $NA = 0.95$ в пятно диаметром $\sim 1\ \mu\text{m}$. Мощность сфокусированного лазерного излучения, измеряемая с помощью кремниевого фотодетектора 11PD100-Si (StandaLtd), варьировалась в диапазоне от 1 mW до 1 μW . Исследование спектров комбинационного рассеяния света образцов проводилось в схеме на отражение (в геометрии обратного рассеяния). Спектроскопия КРС осуществлялась в диапазоне $500\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$, с разрешением 3 cm^{-1} .

Морфология поверхности углеродных слоев исследовалась с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ). Исследования АСМ были реализованы при помощи атомно-силового микроскопа SmartSPM (AIST-NT, в настоящее время производится HARIBA Scientific). АСМ-изображения были получены в разработанной авторами статьи вертикальной моде [8,9]. Эта методика имеет ряд преимуществ по сравнению с обычно применяемым режимом сканирования, предполагающим использование обратной связи для поддержания фиксированного расстояния от кончика зонда до поверхности образца. Вертикальная мода позволяет получать изображения без искажений даже в случае больших перепадов высот и наличия вертикальных стенок. Этот режим является наиболее безопасным с точки зрения сохранности зонда и образца. Вертикальная мода дает

Таблица 1. Технологические условия получения арсенид-галлиевых гетероструктур с углеродной пленкой на поверхности

Структура	Скорость потока CCl_4 , mmol/min	T_{gC} , $^\circ\text{C}$	Толщина покровного слоя GaAs, nm
A	1.25	700	20
B	0.67	650	50
C	1.25	600	50
D	0.67	600	50

Примечание. Для всех структур, указанных в таблице, время подачи CCl_4 в реактор (время формирования углеродного слоя) составляло 20 min.

возможность использовать очень острые зонды при сканировании хрупких и легко деформируемых поверхностей. В настоящей работе сканирование проводилось кантилеверами, на которые мы предварительно наращивали тонкие „усы“ по методике, изложенной в [10].

Оптические свойства изготовленных структур при изменении длин волн от 0.18 до $1.8\ \mu\text{m}$ исследовались методом спектроскопии отражения при почти нормальном падении с использованием спектрофотометра Cary 6000i (Varian). Спектры диффузного отражения получены с использованием приставки DRA-2500 на двухлучевом спектрофотометре Cary 5000 (Varian) в диапазоне длин волн от 0.19 до $0.8\ \mu\text{m}$.

Для исследования электрических свойств структур были выколоты образцы размером $2 \times 2\text{ mm}$. Химически и механически стойкая углеродная пленка выполняла роль верхнего проводящего контакта. Ранее было установлено, что подобные С-слои имеют дырочную проводимость и достаточно низкое слоевое сопротивление [7]. Контакт со стороны подложки n^+ -GaAs формировался электроискровым вжиганием оловянной фольги. С использованием источника и измерителя токов и напряжений Keithley 2400 изучались вольтамперные характеристики (ВАХ) изготовленных образцов. Спектральные характеристики фототока изготовленных образцов были исследованы в диапазоне длин волн от 0.2 до $1.5\ \mu\text{m}$ с использованием оригинальной автоматизированной установки, собранной на базе монохроматора МДР-23. Все перечисленные исследования проводились при комнатной температуре.

3. Результаты и обсуждение

Исследование структурных свойств изготовленных термическим разложением CCl_4 углеродных пленок осуществлялось с применением спектроскопии комбинационного рассеяния. Спектр комбинационного рассеяния углеродного слоя, сформированного при температуре 700°C , и его аппроксимация функциями Лоренца показаны на рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния

Таблица 2. Параметры подгоночных лоренцианов для образцов А, В и С

Структура	Параметр	Пик D	Пик G	Пик 2D	Пик D + D'	Пик 2D'	I_{2D}/I_G	I_D/I_G	L_a, nm
А	x_c, cm^{-1}	1354	1607	2704	2946	3200	0.3	1.59	~ 7.6
	w, cm^{-1}	130	70	225	215	150			
	S	67	42	13	19	5			
В	x_c, cm^{-1}	1355	1607	2724	2950	3202	0.29	1.55	~ 8.4
	w, cm^{-1}	120	75	200	180	190			
	S	42	27	9	10	6.8			
С	x_c, cm^{-1}	1352	1608	2705	2937	3202	0.39	1.7	~ 7.1
	w, cm^{-1}	200	90	350	220	230			
	S	140	82	32	30	12			

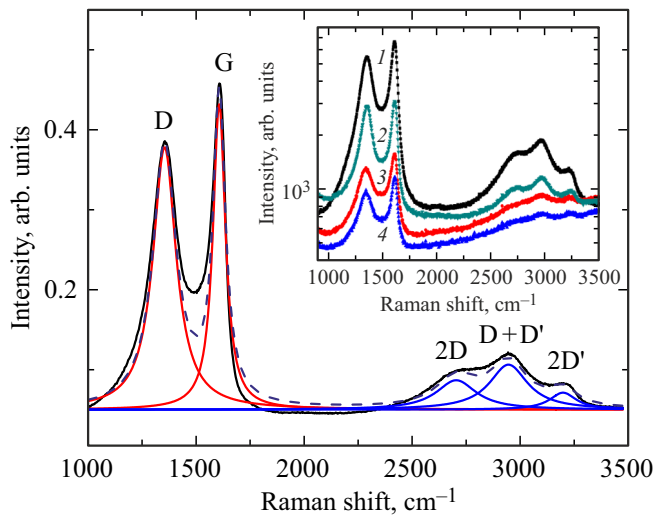


Рис. 1. Спектр комбинационного рассеяния образца А (С-слой изготовлен при 700°C) и разложение его на пики, определенные аппроксимацией с использованием функции Лоренца. На вставке приведены спектры комбинационного рассеяния углеродных слоев для структур А (1), В (2), С (3) и D (4) (технологическое описание структур дано в табл. 1).

полученных при различной температуре С-слоев представлены на вставке рис. 1. Параметры подгоночных лоренцианов (положение пика x_c , полная ширина на полувысоте w и площадь под пиком S) представленных спектров приведены в табл. 2.

Видно, что в спектре комбинационного рассеяния высокотемпературного ($T_{\text{гс}} = 700^\circ\text{C}$) углеродного слоя присутствуют следующие пики: G (вблизи 1607 cm^{-1}) — графитоподобный пик, D (при 1354 cm^{-1}) — пик, обусловленный присутствием дефектов в графите/графене, пики 2D (положение — 2704 cm^{-1}), D + D' (при 2946 cm^{-1}) и 2D' вблизи $\sim 3200 \text{ cm}^{-1}$. Полоса 2D является обертоном второго порядка линии D. Отношение

интегральных интенсивностей пиков D и G в определенной степени характеризует разупорядочение углеродной структуры. Следует отметить, что положение пика G значительно смещено в область больших энергий по отношению к положению пика для монокристаллического графита 1580 cm^{-1} . Это обстоятельство также является признаком разупорядочения в слоях, поскольку в данном случае смещение пика G и его уширение, по-видимому, связаны с присутствием пика D' выше по энергии, также появляющегося вследствие присутствия дефектов. При значительном разупорядочении пики G и D' уширяются и становятся трудноразрешимыми, поэтому их идентифицируют как один пик G. Наблюдаемые полосы D, D', D + D' и 2D' являются результатом дефектов и беспорядка, которые могут возникнуть из-за большого количества краевых состояний нанографитного базового слоя и точечных дефектов [5]. Подобным образом выглядит спектр комбинационного рассеяния С-слоя, полученного при $T_{\text{гс}} = 650^\circ\text{C}$ (спектр 2 на вставке рис. 1). Если провести сопоставление наблюдаемых спектров комбинационного рассеяния углеродных слоев, полученных методом термического разложения четыреххлористого углерода при температурах 650 и 700°C , с литературными данными (например, [5,6,11,12]), то оказывается, что характеристики наблюдаемых в спектрах КРС полос и их вид в целом подобны спектрам комбинационного рассеяния вертикального графена — углеродных наноструктур, называемых в более ранних работах как углеродные наностенки [11] или нанокристаллический графит [12].

Сопоставляя представленные на рис. 1 и в табл. 2 данные с технологическими условиями формирования С-слоев (табл. 1), можно увидеть тенденцию к существенному изменению спектров КРС с уменьшением температуры процесса до 600°C . В частности, наблюдается снижение величины сигнала в целом, вероятно, обусловленное меньшей толщиной углеродной пленки, полученной при 600°C (спектры 3 и 4, вставка на

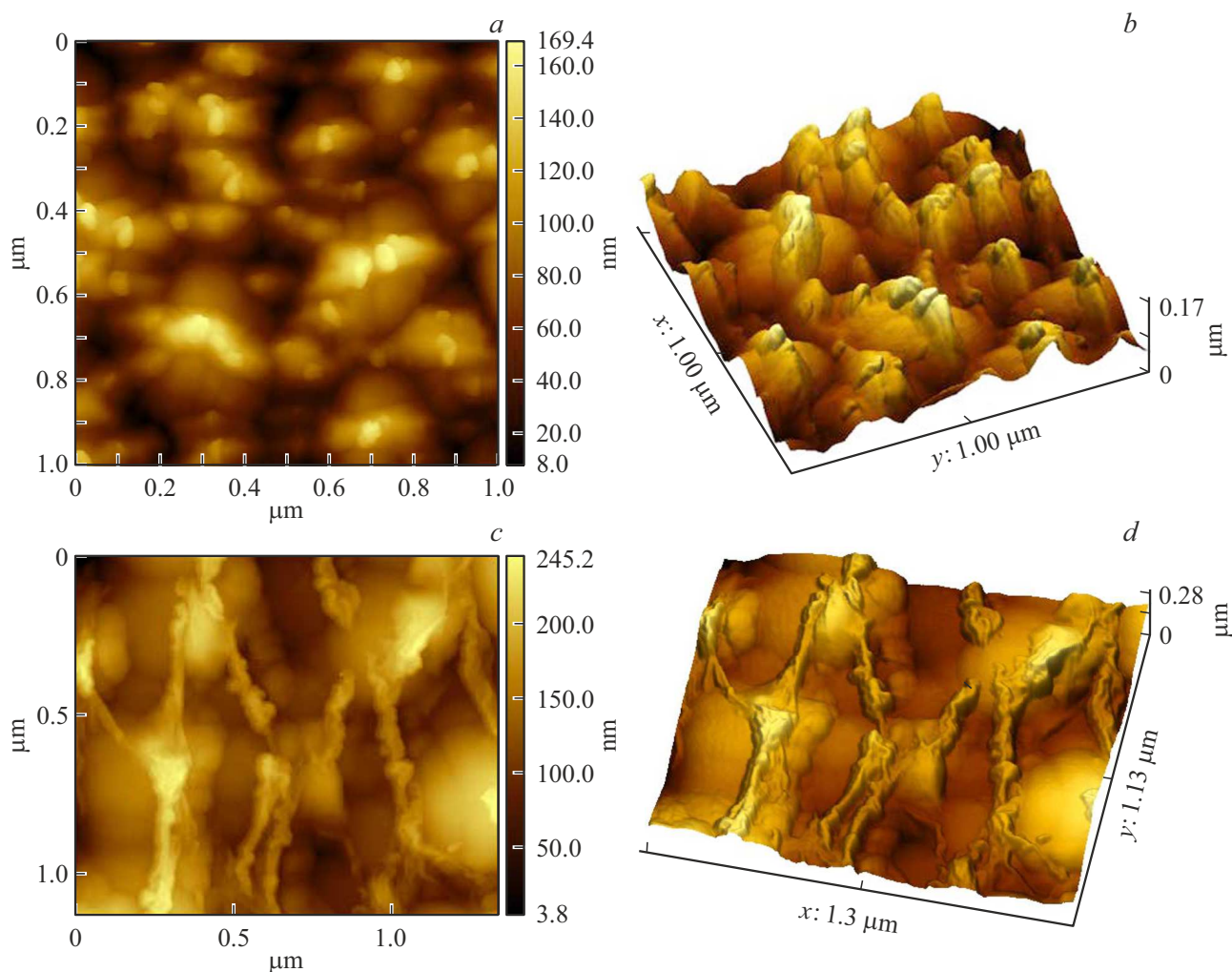


Рис. 2. АСМ-изображения углеродных слоев, сформированных при $T_{gC} = 650^\circ\text{C}$ (фрагменты *a, b*) и $T_{gC} = 700^\circ\text{C}$ (фрагменты *c, d*), на поверхности арсенид-галлиевой структуры.

рис. 1). Значительно увеличивается ширина на полувысоте пиков G и D (табл. 2). Кроме того, пики в области 2D, D + D' и 2D' становятся размытыми и их сложно выделить посредством аппроксимации при нарастающем фоновом сигнале. Все перечисленные эффекты свидетельствуют об ухудшении структурных свойств углеродных слоев с понижением температуры роста до 600°C . При этом, согласно [13,14] полученные данные спектроскопии комбинационного рассеяния позволяют идентифицировать эти углеродные пленки как нанокристаллический графит. Это также было показано нами ранее в работе [7].

С другой стороны, нанокристаллический графит можно рассматривать как фазу, близкую к многослойному графену [13,14], то есть представлять в виде зерен многослойного графена. Оценочный расчет количества слоев в многослойном графене осуществляется по отношению интегральной интенсивности (S) пиков 2D и G (I_{2D}/I_G). Согласно [15], эта величина равнялась 0.15 для 7–8 слойного графена и составляла 0.27 для

4–5 слойного графена. Как видно из данных таблицы 2, в нашем случае величина A составляет 0.3–0.4 и можно полагать, что мы имеем дело приблизительно с 5-тислойным графеном. Размер зерна многослойного графена в плоскости слоя оценивался по следующей формуле $L_a = (2.4 \cdot 10^{-10}) \times \lambda^4 / (I_D/I_G)$ [16], результаты также приведены в табл. 2.

Как отмечается в [5,11], в случае вертикального графена средняя латеральная протяженность наностенок может быть оценена по значению I_D/I_G , убывающему почти линейно с увеличением латеральной длины отдельных наностенок [11]. В обзоре сообщается [5], что подобная зависимость I_D/I_G от средней латеральной длины наностенок подтверждена многими исследователями и также может быть объяснена приведенной выше эмпирической формулой, описывающей взаимосвязь между плоскостными кристаллитами размера L_a , длиной волны лазерного источника, используемого для наблюдения комбинационного рассеяния, и соотношением I_D/I_G . Согласно полученным нами значениям отно-

шение I_D/I_G составляет $\sim 1.55–1.59$ для углеродных пленок, изготовленных методом термического разложения CCl_4 при температурах $650–700^\circ\text{C}$ на поверхности GaAs. Сопоставляя эти результаты с литературными данными [11], можно ожидать, что средний латеральный размер графеновых наностенок будет составлять около $1\ \mu\text{m}$.

Результаты высокочувствительных АСМ-исследований поверхности углеродных слоев, изготовленных при температурах 650 и 700°C , приведены на рис. 2. Видно, что в обоих случаях поверхность углеродной пленки имеет ячеистую (зернистую) структуру, поверх ячеек размером примерно от 200 до $500\ \text{nm}$ располагаются значительно более тонкие плоскостные образования, которые можно идентифицировать как вертикальный графен. Изображение углеродной пленки, полученной при температуре 650°C (фрагменты *a* и *b*), выглядит так, как будто формирование вертикально стоящих плоскостей графита только начинается (максимальная их высота не превышает $50–70\ \text{nm}$). В случае С-слоя, изготовленного при температуре 700°C (фрагменты *c*, *d*), изображение АСМ демонстрирует расположенные поверх ячеистой поверхности, более протяженные (в среднем около $1\ \mu\text{m}$) и высокие (около $100\ \text{nm}$) вертикальные углеродные наностенки (толщина их может составлять не более $10–20\ \text{nm}$). Как было установлено в ходе исследований, наблюдаемые вертикальные плоскости расположены параллельно одному из направлений $[110]$ кристаллической решетки GaAs. В случае углеродных пленок, изготовленных при температуре 600°C , подобных вертикальных наноразмерных плоскостей на АСМ-изображении не наблюдалось.

При проведении исследований было установлено, что температура подложки при разложении CCl_4 оказывает сильное влияние на оптические свойства формирующихся углеродных пленок. На рис. 3 показаны спектры отражения арсенид-галлиевых структур с углеродной пленкой на поверхности, полученной при температуре 700°C (образец А) и 600°C (образец С). Сплошные линии соответствуют спектрам отражения, полученным при почти нормальном падении, пунктирные линии — спектрам диффузного отражения. Для случая С-слоя, изготовленного при 600°C спектр отражения полностью подобен спектру отражения монокристаллического GaAs; так, он содержит в области энергий квантов от 2 до $4\ \text{eV}$ (глубина проникновения излучения составляет около $20\ \text{nm}$) характерный для монокристаллического GaAs дублет пиков в области энергий E_1 ($2.9\ \text{eV}$) и $E_1 + \Delta_1$ ($3.12\ \text{eV}$) (отмечены вертикальными линиями), соответствующий переходам в направлении Λ зоны Бриллюэна [17]. Причем значения коэффициентов отражения на всем рассматриваемом спектральном диапазоне также совпадают с данными для гладкой поверхности GaAs. Следует также отметить, что диффузный спектр полностью совпадает со спектром отражения при почти нормальном падении для образца С.

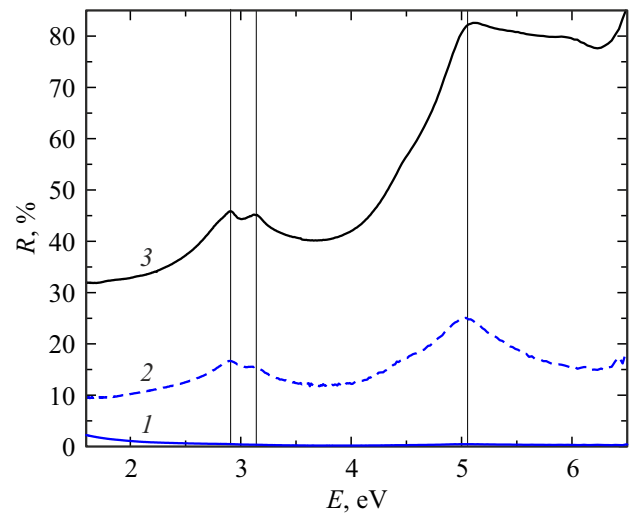


Рис. 3. Спектры отражения структур с углеродной пленкой на поверхности, полученные при почти нормальном падении исходного излучения (сплошные линии 1 и 3), и спектры диффузного отражения (пунктирная линия 2) в диапазоне энергий квантов излучения от 1.5 до $6.5\ \text{eV}$. Спектры 1 и 2 относятся к структуре А, спектр 3 соответствует структуре С.

Повышение температуры выращивания до $650–700^\circ\text{C}$ приводит к существенному уменьшению коэффициента отражения при почти нормальном падении излучения (до $1–10\%$ при 700°C) на всем исследуемом диапазоне длин волн. Вид спектра диффузного отражения для образца, изготовленного при 700°C , подобен спектру отражения для монокристаллического GaAs, но величина коэффициента отражения не превышает 25% . Наблюдаемая разница в представленных спектрах свидетельствует о значительном рассеянии излучения на шероховатостях поверхности структуры А. Также оптические характеристики спектра диффузного отражения позволяют предположить, с одной стороны, существование достаточно качественной границы раздела углеродный слой/GaAs и, с другой стороны, показывают возрастание поглощения падающего излучения структурой с углеродной пленкой (вертикальным графеном).

Ранее было также показано [7], что подобные углеродные слои имеют дырочный тип проводимости, являются достаточно низкоомными, обладают химической и механической стойкостью. Поэтому наличие у них способности увеличивать „поглощательную“ способность арсенид-галлиевых структур делает их перспективными в качестве проводящего контакта в фоточувствительных полупроводниковых приборах. Это подтверждается предварительными результатами исследований вольт-амперных характеристик и спектральных зависимостей фототока для структур с углеродной пленкой, изготовленной при 700 и 600°C (структуры А и С, соответственно). Изготовленные структуры демонстрируют диодные вольт-амперные характеристики (вставка на рис. 4), причем в случае структуры с высокотемпе-

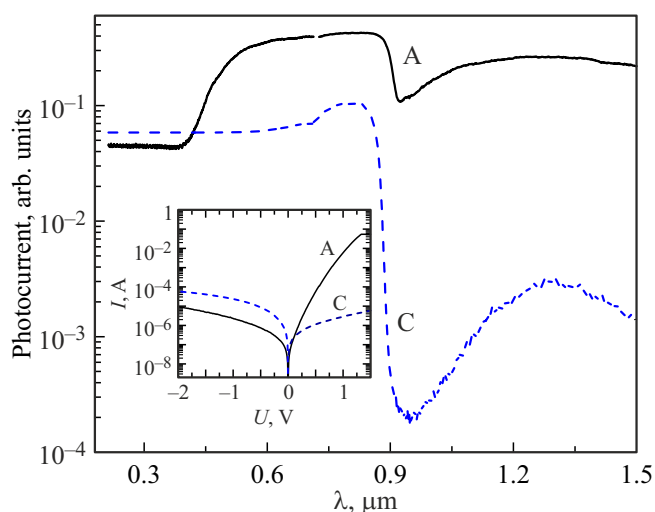


Рис. 4. Спектральные зависимости фототока структур А и С. На вставке приведены соответствующие вольт-амперные характеристики. Измерения выполнены при комнатной температуре.

ратурным С-слоем обратные токи достаточно низкие (составляют $10\ \mu\text{A}$ при напряжении смещения $-2\ \text{V}$), а ток в прямом направлении возрастает до $50\ \text{mA}$ при напряжении около $1.4\ \text{V}$. Это свидетельствует о формировании качественного барьера на границе раздела С-слой/GaAs. Вид вольт-амперной характеристики для углеродной пленки, изготовленной при 600°C , показывает значительное ухудшение характеристик такого барьера: большие обратные токи и медленное нарастание тока при прямом смещении.

Полученные электрические характеристики хорошо коррелируют с фотоэлектрическими свойствами исследованных структур. Из приведенных на рис. 4 спектральных зависимостей фототока видно, что в случае структуры А (для которой С-слой можно идентифицировать как вертикальный графен) наблюдается значительное увеличение регистрируемого сигнала в области видимого излучения (длина волны от 0.4 до $0.85\ \mu\text{m}$) по сравнению со спектральной зависимостью фототока для углеродной пленки, изготовленной при 600°C (структура С). Кроме того, в спектре структуры А регистрируется возрастание фототока на два порядка величины при длинах волн свыше $0.85\ \mu\text{m}$. Для выяснения механизмов появления таких спектральных зависимостей фототока в случае структуры с вертикальным графеном на поверхности необходимо провести дополнительные исследования. Вместе с тем, полученные данные позволяют рассматривать подобные арсенид-галлиевые структуры с углеродной пленкой, полученной термическим разложением четыреххлористого углерода при температурах $650\text{--}700^\circ\text{C}$, в качестве перспективных кандидатов для создания фоточувствительных элементов (фотоприемников и солнечных элементов).

4. Заключение

Таким образом, методом термического разложения четыреххлористого углерода в потоке водорода на поверхности GaAs получены углеродные структуры и исследованы их морфология и свойства. Атомно-силовой микроскопией показано, что при температурах роста 650 и 700°C образуется массив вертикально ориентированных нанослоев (вертикальный графен). Исследования комбинационного рассеяния света позволили заключить, что мы имеем дело с графитоподобными поликристаллическими нанослоями, имеющими размер зерна порядка $7\text{--}8\ \text{nm}$ и число графеновых слоев в зернах около 5 . Вследствие развитой морфологии слои имеют низкий коэффициент отражения в видимом диапазоне длин волн. Структуры С-слой/GaAs обладают выпрямляющими свойствами с низкими обратными токами и демонстрируют заметную фоточувствительность в диапазоне длин волн $0.9\text{--}1.5\ \mu\text{m}$.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Программы стратегического академического лидерства „Приоритет-2030“ (проект ННГУ им. Н.И. Лобачевского № 480-99). АСМ-исследования проводились в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. Zheng, X. Zhao, W. Fu. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13**, 9561 (2021).
- [2] Z. Yue, I. Levchenko, S. Kumar, D. Seo, X. Wang, S. Dou, K. Ostrikov. *Nanoscale* **5**, 19, 9283 (2013).
- [3] J. Chen, Z. Bo, G. Lu. *Vertical-Oriented Graphene*. Springer (2015). 113 p.
- [4] Z. Bo, S. Mao, Z.J. Han, K. Cen, J. Chen, K. Ostrikov. *Chem. Soc. Rev. On-line publ.* (2015).
- [5] Z. Bo, Y. Yang, J. Chen, K. Yu, J. Yan, K. Cena. *Nanoscale* **5**, 5180 (2013).
- [6] M. Akbari, M. Kamruddin, R. Morad, S. Khamlich, R. Bucher. *Mater. Today: Proceedings* **36**, 232 (2021).
- [7] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, П.Б. Демина, М.Н. Дроздов, А.В. Здоровейшев, Р.Н. Крюков, А.В. Нежданов, И.Н. Антонов, С.М. Планкина, М.П. Темирязева. *ФТП* **54**, 8, 801 (2020).
- [8] А.Г. Темирязов, В.И. Борисов, С.А. Саунин. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* **7**, 93 (2014).
- [9] A.G. Temiryazev, A.V. Krayev, M.P. Temiryazeva. *Beilstein J. Nanotechnol.*, **12**, 1226 (2021).
- [10] A. Temiryazev, S.I. Bozhko, A.E. Robinson, M. Temiryazeva. *Rev. Sci. Instruments* **87**, 113703 (2016).

- [11] S. Kurita, A. Yoshimura, H. Kawamoto, T. Uchida, K. Kojima, M. Tachibana, P. Molina-Morales, H. Nakai. *J. Appl. Phys.*, **97**, 104320 (2005).
- [12] V.A. Krivchenko, V.V. Dvorkin, N.N. Dzbanovsky, M.A. Timofeyev, A.S. Stepanov, A.T. Rakhimov, N.V. Suetin, O.Yu. Vilkov, L.V. Yashina. *Carbon* **50**, 4, 1477 (2012).
- [13] A.C. Ferrari. *Solid State Commun.* **143**, 47 (2007).
- [14] A.C. Ferrari, J. Robertson. *Phys. Rev. B*, **61**, 20, 14095 (2000).
- [15] S.R.S. Kumar, H.N. Alshareef. *Appl. Phys. Lett.* **102**, 012110 (2013).
- [16] L.G. Cancado, K. Takai, T. Enoki, M. Endo, Y.A. Kim, H. Mizusaki, A. Jorio, L.N. Coelho, R. Magalhaes-Paniago, M.A. Pimenta. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 163106 (2006).
- [17] Ю.И. Уханов. *Оптические свойства полупроводников. Наука, М. (1977)*. 139 с.

Редактор К.В. Емцев