07

Характеристики спиновых светоизлучающих диодов, полученных с использованием углеродных слоев

© И.Л. Калентьева, М.В. Ведь, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, А.В. Здоровейщев, В.П. Лесников, А.В. Нежданов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603022 Нижний Новгород, Россия
e-mail: istery@rambler.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 24 апреля 2026 г.
Принято к публикации 24 апреля 2026 г.

Проведены комплексные исследования лабораторных образцов спиновых светоизлучающих диодов на основе арсенид-галлиевых структур, имеющих в составе контакта наноразмерный углеродный слой, полученный методом импульсного лазерного нанесения. Показано, что введение углеродного слоя в структуру диода с ферромагнитным инжектором на основе сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ способствует значительному повышению интенсивности электролюминесценции светодиодов, снижению их рабочих токов и повышению температуры эксплуатации (интенсивное излучение сохраняется до комнатной температуры).

Ключевые слова: спиновый светоизлучающий диод, импульсное лазерное нанесение, углеродный слой, электролюминесценция.

DOI: 10.61011/JTF.2026.09.63498.131-26

Введение

Спиновые светоизлучающие диоды (ССИД) представляют значительный интерес для развития современных подходов к построению оптоэлектронных приборов и разработки оптоэлектронных схем. По сравнению с обычным светодиодом такой диод обладает дополнительными возможностями для кодировки и передачи сигнала благодаря своим поляризационным характеристикам излучения. Ранее нами были получены и исследованы ССИД InGaAs/GaAs с ферромагнитным контактным слоем на основе сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ [1]. Измерения магнитооптических эффектов подтвердили наличие оси легкого намагничивания, расположенной перпендикулярно плоскости пленки $Co_{0.45}Pt_{0.55}$. Важной особенностью слоев $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ является высокое значение остаточной намагниченности, что обеспечивает функционирование спиновых светоизлучающих диодов без приложения постоянного магнитного поля [1]. Вместе с тем существует необходимость в нахождении способов дальнейшего улучшения эксплуатационных характеристик таких ССИД (повышение интенсивности излучения, оптимизации электрических свойств и т. п.) с тем, чтобы более достоверно и надежно управлять поляризацией излучения диода. Один из возможных технологических методов связан с изменениями в конструкции инжектирующего контакта на основе соединения $Co_{0.45}Pt_{0.55}$. Так, было предложено апробировать введение в его состав наноразмерного углеродного слоя (C-слоя), выращенного методом импульсного лазерного нанесения (ИЛН) непосредственно на поверхности арсенид-галлиевой структуры перед формированием пленки $Co_{0.45}Pt_{0.55}$. Ранее нами было продемонстрировано успешное применение полученных ИЛН углеродных слоев для создания проводящих покрытий фоточувствительных и светоизлучающих GaAs-структур [2]. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) изготовленных структур показали, что на границе раздела углеродный слой/GaAs формируется потенциальный барьер, в результате чего наблюдается выпрямление на структуре C-слой/n-GaAs. Обнаружено, что интенсивная электролюминесценция светодиода C-слой/n-GaAs с квантовой ямой InGaAs наблюдается вплоть до комнатной температуры при невысоких токах накачки (2–5 mA). Достаточно высокая фоточувствительность (фототок) наблюдалась при комнатной температуре в диапазоне энергий квантов 1.43–2.3 eV [2]. Следует также отметить, что используемый нами метод ИЛН остается на сегодняшний день, пожалуй, основным способом нанесения графеноподобных углеродных слоев непосредственно на поверхность GaAs-структур. Как правило, научные группы, работающие в направлении создания подобных гибридных структур, используют разнообразные химические способы переноса графена с металлической фольги на поверхность GaAs (см., например, [3,4]).

При выполнении настоящей работы были изготовлены лабораторные образцы ССИД с углеродным слоем, исследовались их электрические, излучательные и поляризационные характеристики. Обнаружено, что введение углеродного слоя в структуру ССИД с ферромагнитным инжектором на основе сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ способствует значительному повышению интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) светодиодов, снижению их рабочих токов и повышению температур эксплуатации (интенсивное излучение сохраняется до комнатной температуры). Вместе с тем зарегистрированы эффекты

уменьшения степени циркулярной поляризации электролюминесцентного излучения диодов, что может быть обусловлено влиянием углеродной пленки на поверхностные состояния GaAs, закрепление уровня Ферми и, как следствие, на механизмы инжекции и релаксации спин-поляризованных носителей.

1. Методика эксперимента

Формирование структур производилось в несколько этапов. На первом этапе методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении и температуре 600 °C были получены полупроводниковые гетероструктуры InGaAs/GaAs на пластинах n^+-GaAs ориентации (100). Подробное описание сформированных структур представлено в таблице. Активная область структур представляла собой квантовую яму $In_xGa_{1-x}As$/GaAs с содержанием индия $x \sim 0.15-0.17$. Буферный слой GaAs легировался в процессе выращивания кремнием до концентрации $\sim 6 \cdot 10^{17}\,cm^{-3}$. Углеродный слой на поверхности гетеронаноструктур был выращен методом распыления пирографита импульсным лазером в вакууме (давление ниже 10^{-6} Torr) [5]. Источником излучения являлся АИГ:Nd лазер LQ 529, работающий в режиме модулированной добротности и излучающий на второй гармонике (длина волны 532 nm). Излучение фокусировалось на мишени в пятно площадью $\sim 1.5\,mm^2$. Температура подложки составляла 500 °C, а время процесса — 20 s (оцениваемая по скорости нанесения толщина C-слоя ~ 4 nm). Оценка скорости роста углеродного слоя основана на результатах проведенных ранее исследований. Так, методом рентгеновской дифракционной рефлексометрии на аналогичных образцах (C-слой на GaAs) измерены толщины и шероховатости углеродных слоев [2]. Установлено, что скорость нанесения C-слоя при температуре процесса $T_g = 500$ °C составляла 0.19 nm/s. Состав и профили распределения элементов в GaAs- и Ge-структурах с подобными углеродными слоями были исследованы методом вторичной ионной масс-спектрометрии [2] и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) [6]. Полученные данные также подтвердили приведенное выше значение скорости роста углеродного слоя для используемой нами температуры процесса.

Описание структур, используемых для изготовления спиновых светоизлучающих диодов с прослойкой из углеродной пленки

№	Описание структуры
A	Покровный слой GaAs$\sim$ 20 nm Квантовая яма $In_xGa_{1-x}As$ (8–10 nm, $x \sim 0.17$) Буферный слой GaAs:Si толщиной 280–300 nm Подложка n^+-GaAs(100)
B	Покровный слой GaAs$\sim$ 36 nm Квантовая яма $In_xGa_{1-x}As$ (8–10 nm, $x \sim 0.15$) Буферный слой GaAs:Si толщиной 550 nm

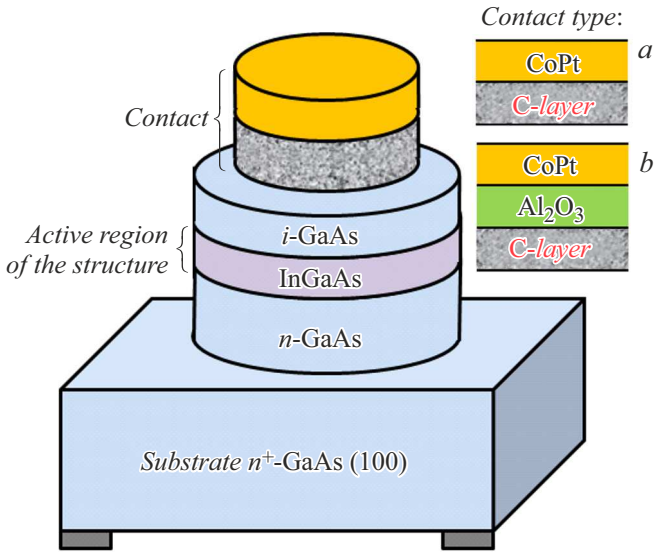

Рис. 1. Схематическое изображение изготовленных мезадиодов с пленкой многослойного графена (C-слой) и слоем ферромагнитного сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$.

По результатам электрических измерений на контрольном образце с аналогичным слоем, но на подложке i-GaAs (100), C-слой имеет p-тип проводимости с удельным сопротивлением порядка $10^{-2}\,\Omega\cdot$cm.

Морфология поверхности углеродных слоев исследовалась с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ). Исследования АСМ были реализованы при помощи атомно-силового микроскопа SmartSPM (AIST-NT).

Исследовались спектры комбинационного рассеяния света (КРС) изготовленных структур. Измерения КРС проводились на установке NTEGRA SPECTRA (NT-MDT) в геометрии обратного рассеяния с использованием лазера с длиной волны 473 nm. Излучение фокусировалось 100× объективом с апертурой $NA = 0.95$ в пятно диаметром $\sim 1\,\mu$m. Мощность лазерного излучения варьировалась в диапазоне от 1 mW до $1\,\mu$W. Спектры КРС измерялись в диапазоне $500-3500\,cm^{-1}$ с разрешением $3\,cm^{-1}$.

Далее структуры раскалывались на образцы размером 15×15 mm, затем методом электронно-лучевого испарения в высоком вакууме через металлическую маску осаждался слой (толщиной $\sim 8-10$ nm) ферромагнитного сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$. Слой $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ наносился либо поверх углеродной пленки, либо поверх предварительно выращенного туннельно-тонкого (~ 1 nm) слоя диэлектрика Al_2O_3. Далее с использованием фотолитографии, ионно-плазменного травления углеродной пленки в атмосфере кислорода и химического травления полупроводниковых слоев образцов были изготовлены мезаструктуры диаметром 500 или $1000\,\mu$m.

Перечислим виды изготовленных образцов мезадиодов (схематическое изображение показано на рис. 1):

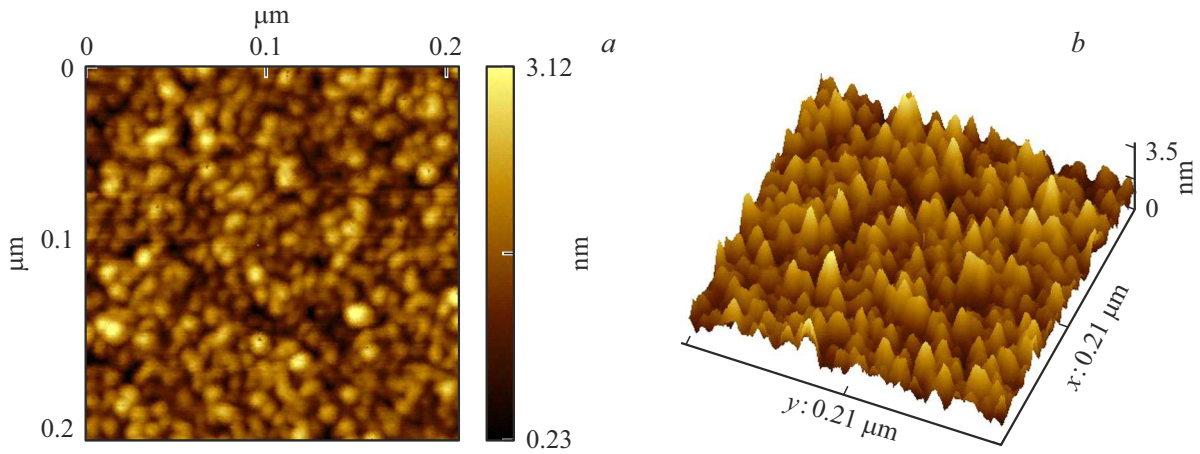

Рис. 2. АСМ изображение поверхности углеродного слоя, изготовленного методом импульсного лазерного нанесения (температура роста 500 °C, технологическая толщина ∼ 4 nm) на поверхности арсенид-галлиевых гетеронаноструктур.

— образцы на основе GaAs гетероструктуры с углеродной пленкой и осажденным на нее слоем ферромагнитного сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$;

— образцы на основе GaAs гетероструктуры с углеродной пленкой, слоем туннельно-тонкого диэлектрика Al_2O_3 и слоем ферромагнитного сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$.

Кроме того, на основе представленных в таблице гетеронаноструктур были изготовлены контрольные образцы мезадиодов (без углеродного слоя) со слоями туннельно-тонкого диэлектрика Al_2O_3 и ферромагнитного сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$.

Излучательные свойства изготовленных диодов исследовались при квазинепрерывной токовой накачке в диапазоне токов до 100 mA для регистрации спектров ЭЛ.

Изучались ВАХ и магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесцентного излучения (PEL) при развертке магнитного поля в пределах ±3600 Oe. Исследования проводились с использованием источника-измерителя Keithley 2400 и гелиевого криостата замкнутого цикла Janis CCS-300S/202 при температурах от 10 до 300 K.

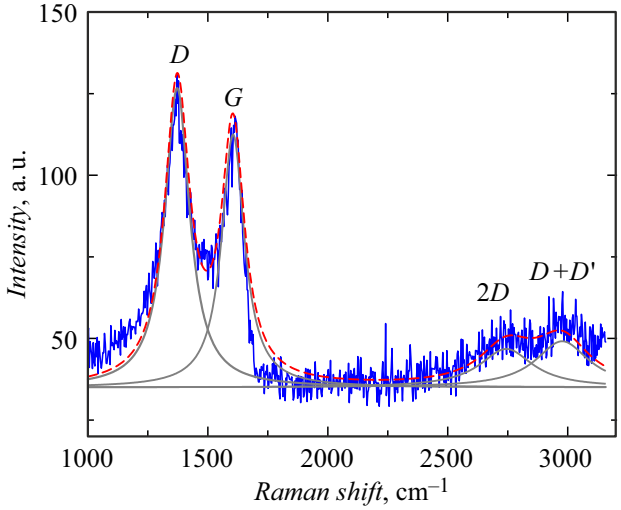

Рис. 3. Спектр комбинационного рассеяния света для углеродного слоя, изготовленного методом импульсного лазерного нанесения (температура роста 500 °C, технологическая толщина ∼ 4 nm) на поверхности арсенид-галлиевых гетеронаноструктур.

2. Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований морфологии углеродных слоев, изготовленных методом импульсного лазерного нанесения на поверхности арсенид-галлиевых гетеронаноструктур, показаны на рис. 2. Изображение АСМ демонстрирует зернистую структуру сплошного углеродного слоя, толщину которого можно оценить согласно представленной на рисунке шкале как ∼ 3 nm. Размер скана представленного изображения составляет $0.21 \times 0.21\,\mu$m. Следовательно, если сосчитать приблизительное количество зерен, можно оценить латеральный размер зерна как 8–10 nm.

Спектр комбинационного рассеяния С-слоя, сформированного на поверхности арсенид-галлиевой гетероструктуры, показан на рис. 3. В спектре присутствуют следующие пики: G — основной пик для графитоподобных материалов с sp^2-связями между атомами углерода, D — пик, обусловленный присутствием дефектов в графеновой плоскости. Отношение интенсивностей пиков D и G в определенной степени характеризует разупорядочение углеродной структуры. Следует отметить, что положение пика G смещено в область больших энергий (1605–1610 cm^{-1}) по отношению к положению пика 1580 cm^{-1} для монокристаллического графита, что также является признаком разупорядочения в слоях. В данном случае смещение пика G и его уширение

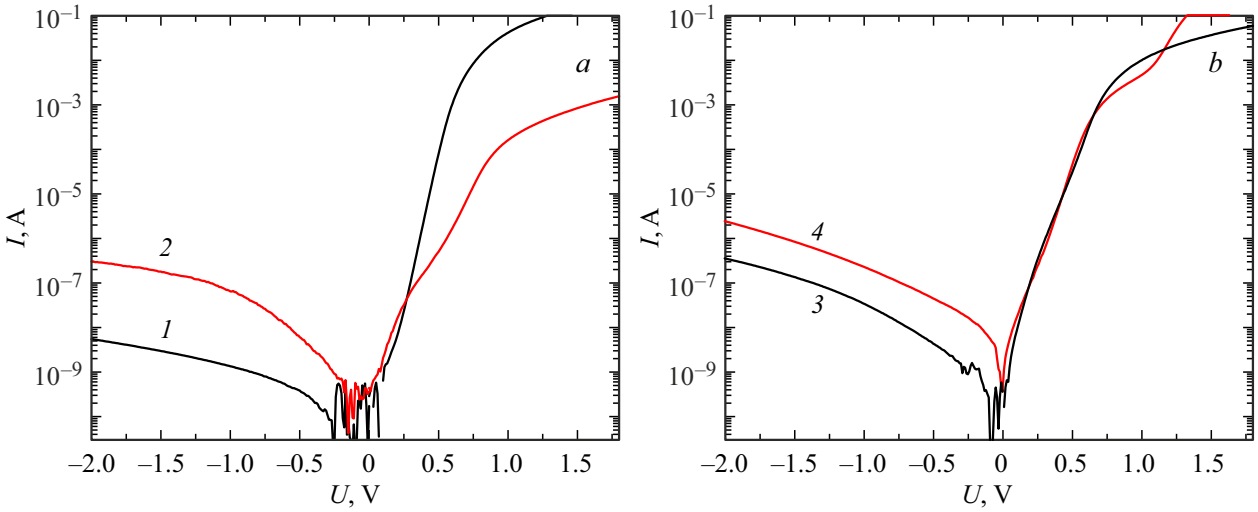

Рис. 4. ВАХ при комнатной температуре мезадиодов, изготовленных на основе гетероструктур А (*a*) и В (*b*). Зависимости *1* и *2* фрагмента (*a*) соответствуют мезадиодам с контактами $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ и $Co_{0.45}Pt_{0.55}$/C-слой, а зависимости *3* и *4* фрагмента (*b*) — мезадиодам с контактами $Co_{0.45}Pt_{0.55}/Al_2O_3$ и $Co_{0.45}Pt_{0.55}/Al_2O_3$/C-слой.

может быть связано 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 обычно идентифицируют как пик G. В спектрах, кроме пиков G и D, присутствуют пики $2D$ (полоса $2D$ является обертоном второго порядка линии D) и $D + D'$. Можно полагать, что представленный на рис. 3 спектр подобен спектрам КРС для многослойного графена (нанокристаллического графита) [7]. Аппроксимация спектра лоренцианами позволяет сделать оценку параметров пиков по методике, представленной в работах [7,8]. Значение ширины пика $2D$ на полувысоте (FWHM) составило около $270\,\mathrm{cm}^{-1}$. Из литературы известно значение $74\,\mathrm{cm}^{-1}$ для трехслойного графена и $402\,\mathrm{cm}^{-1}$ для 7–8-слойного. Полученное нами значение может соответствовать приблизительно 5–6-слойному графену. Размер зерна (области когерентности) графена, оцененный по соотношению площадей под пиками D и G, составил $\sim 8-9\,\mathrm{nm}$.

В целом, исследования методом АСМ и проведенный анализ спектров КРС позволяют идентифицировать сформированный на поверхности арсенид-галлиевых структур наноразмерный углеродный слой как графеноподобный углеродный слой.

Теперь перейдем к анализу темновых ВАХ всех перечисленных выше типов мезадиодов, измеренных при комнатной температуре. Необходимо отметить, что ВАХ образцов, изготовленных на основе структур А и В, выглядят подобным образом. На рис. 4 представлены зависимости, полученные для мезадиодов, изготовленных на основе обеих гетероструктур А (*a*) и В (*b*). Зависимости *1* и *2* рис. 4, *a* соответствуют мезадиодам с контактами $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ и $Co_{0.45}Pt_{0.55}$/C-слой (структура А) соответственно. Зависимости *3* и *4* рис. 4, *b* отвечают мезадиодам с контактами $Co_{0.45}Pt_{0.55}/Al_2O_3$ и $Co_{0.45}Pt_{0.55}/Al_2O_3$/C-слой (структура В) соответственно.

Видно, что токи насыщения обратной ветки ВАХ находятся в диапазоне $\sim 10^{-8}-3\cdot 10^{-7}\,\mathrm{A}$ при напряжении — 2 V для образцов с контактами $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ и $Co_{0.45}Pt_{0.55}/Al_2O_3$. Введение в конструкцию контакта С-слоя способствует увеличению обратного тока примерно на порядок величины. Вид прямой ветки ВАХ отличается для двух рассматриваемых случаев (диодов с углеродным слоем и без него). В случае ССИД с барьером Шоттки $Co_{0.45}Pt_{0.55}/Al_2O_3$ или $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ при прямом смещении выше $\sim 0.5-0.7\,\mathrm{V}$ ток через диод стремится к насыщению. В случае диодов с углеродной пленкой при таких значениях напряжения ток вначале также выходит на плато, а затем продолжает увеличиваться. Другими словами, наблюдается двухступенчатое поведение ВАХ. По-видимому, в структуре существует еще один барьер (кроме барьера $CoPt/Al_2O_3$/GaAs или CoPt/GaAs) — определяемый характеристиками гетерограницы графеноподобный углеродный слой/GaAs.

В ряде публикаций рассмотрены зонные диаграммы и электронные свойства структур с границей раздела графен/GaAs. При этом в одних работах (см., например, [8,9]) зона проводимости (образована π^*-состояниями) и валентная зона графена (образована π-состояниями) представлены двумя конусами, соприкасающимися в так называемой дираковской точке. Уровень Ферми в графене считается проходящим в валентной зоне, а запрещенная зона отсутствует [9]. В случае легирования графена кремнием (на уровне 2.7–4.5 at.%) появляется запрещенная зона шириной порядка 0.13 eV, а уровень Ферми опускается глубже в валентную зону [10]. Высота потенциального барьера на границе раздела графен/GaAs была определена [10] величиной 0.74 eV, а при легировании графена кремнием — 0.82 eV.

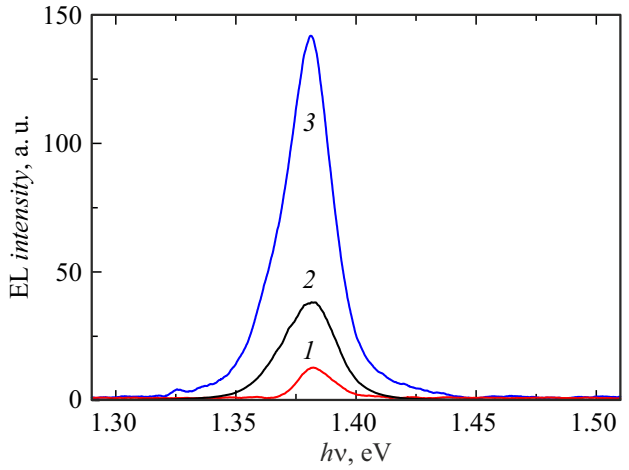

Рис. 5. Спектры ЭЛ изготовленных на основе гетероструктуры B мезадиодов при температуре 77 K. Спектр *1* соответствует случаю контрольного образца со слоем $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ и туннельно-тонким диэлектриком Al_2O_3 (ток накачки 10 mA); спектр *2* — образцу с углеродной пленкой и слоем $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ (ток накачки 10 mA); спектр *3* — случаю мезадиода с углеродной пленкой, туннельно-тонким диэлектриком Al_2O_3 и со слоем $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ (ток накачки 2 mA).

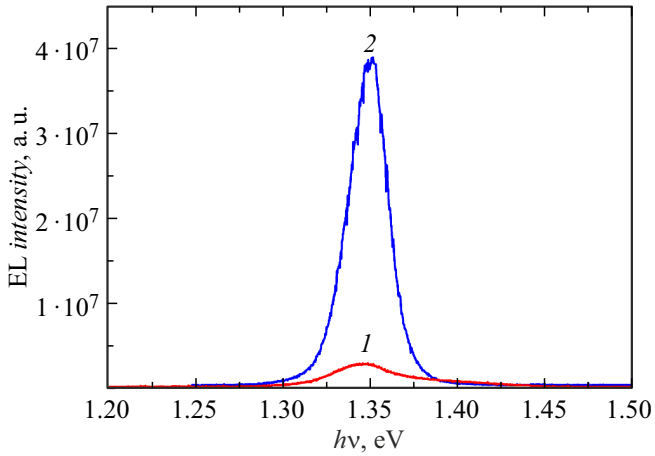

Рис. 6. Спектры ЭЛ изготовленных на основе гетероструктуры A мезадиодов при температуре 77 K. Спектр *1* соответствует случаю контрольного диода со слоем $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ и туннельно-тонким диэлектриком Al_2O_3, не содержащего C-слой на поверхности GaAs (ток накачки 50 mA); спектр *2* отвечает образцу с углеродной пленкой, туннельно-тонким диэлектриком Al_2O_3 и слоем $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ (ток накачки 10 mA).

В других работах (например, [11,12]) для построения зонных диаграмм в структурах на основе GaAs графен трактуется как металл с работой выхода порядка 4.5 eV. Недавно появились публикации относительно границ раздела многослойный графен/GaAs [13]. Вместе с тем можно констатировать, что развитие модельных представлений о границе раздела графен/GaAs находится на начальном этапе.

Предварительно выполненные экспериментальные исследования ВАХ GaAs-структур с углеродным слоем, сформированным импульсным лазерным нанесением, позволили нам сделать оценки высоты барьера для подобных исследованным в работе структур с привлечением термоэмиссионной модели [14]. Расчеты показывают, что аналогичный используемому в изучаемых ССИД C-слой, нанесенный на подложку *n*-GaAs, образует барьер Шоттки с высотой ~ 0.7 eV при комнатной температуре. В предположении, что высота барьера Шоттки (φ_b) определяется разностью работ выхода из C-слоя (Φ_C) и электронным сродством GaAs ($\varphi_b = \Phi_C - \chi_s$, где χ_s — электронное сродство GaAs), и, принимая значение χ_s приближенно равным работе выхода из GaAs (Φ_{GaAs}) 4.1 eV (в случае достаточно сильного легирования полупроводника) [15], можно оценить работу выхода из C-слоя $\Phi_C \approx 4.8$ eV. Последнее значение удовлетворительно совпадает со значениями работы выхода для нелегированного графена (4.89 eV [11] и 4.90 eV [16]).

Присутствие углеродного слоя в структурах с контактом на основе $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ способствует повышению температуры наблюдения электролюминесцентного излучения мезадиодов до комнатной температуры и приводит к значительному снижению токовой накачки. Спектры ЭЛ изготовленных на основе гетероструктуры B диодов при температуре 77 K представлены на рис. 5. Спектр *1* соответствуют случаю контрольного образца со слоем $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ и туннельно-тонким диэлектриком Al_2O_3, спектр *2* отвечает диоду с C-слоем и ферромагнитным слоем $Co_{0.45}Pt_{0.55}$. Спектр *3* относится к случаю мезадиода с C-слоем, туннельно-тонким диэлектриком Al_2O_3 и со слоем $Co_{0.45}Pt_{0.55}$. Видно, что для диодов с углеродным слоем наблюдается значительное увеличение интенсивности электролюминесцентного излучения вблизи энергии основного перехода квантовой ямы $In_xGa_{1-x}As$, являющейся активной областью светодиода. При этом токи накачки значительно снижаются с 10 до 2 mA.

Рис. 6 демонстрирует влияние углеродного слоя на интенсивность ЭЛ мезадиодов с контактом на основе $Co_{0.45}Pt_{0.55}$, изготовленных на основе гетероструктуры A, имеющей более тонкий покровный слой GaAs. Здесь также наблюдается существенный рост сигнала ЭЛ и снижение тока накачки с 50 до 10 mA для образца с углеродным слоем на поверхности структуры по сравнению с контрольным образцом.

Обсудим основные возможные причины такого поведения.

Во-первых, можно ожидать, что присутствие углеродной пленки оказывает значительное воздействие на плотность поверхностных состояний, проявляющееся в уменьшении количества центров безызлучательной рекомбинации в области границы раздела GaAs с контактом $Co_{0.45}Pt_{0.55}/Al_2O_3$ или $Co_{0.45}Pt_{0.55}$. В частности, было показано, что химический перенос графена на поверхность GaAs оказывает пассивирующее воздействие [16]. Углерод восстанавливает соединения мышьяка в оксиде

GaAs, оказывая влияние на состояния на границе раздела графен/полупроводник. В результате спектры фотолюминесценции и терагерцового излучения показывают снижение захвата фотогенерированных носителей заряда на поверхности GaAs, покрытой графеном [17]. В переходе металл/графен/n-GaAs промежуточный графеновый слой играет роль диффузионного барьера, предотвращая атомное перемешивание и сохраняя область низкой плотности ловушек на границе раздела [18]. Кроме того, в работе [18] показано, что графеновый слой может управлять эффективной работой выхода металла, что позволяет формировать как контакты Шоттки, так и омические контакты с металлическими электродами на полупроводниковой подложке, обладающей низкой плотностью поверхностных состояний.

Во-вторых, по-видимому, после нанесения C-слоя происходит изменение зонной структуры, существенно влияющее на образование барьера с контактом $Co_{0.45}Pt_{0.55}/Al_2O_3$ или $Co_{0.45}Pt_{0.55}$. Так, в работе [19] продемонстрированы гетеропереходы p-типа графен/квантовые точки InAs/n-типа GaAs для светодиодов с длиной волны 1.3 μm, где p-графен используется в качестве сверхтонкого слоя акцепторной природы. Эти гибридные устройства демонстрируют в 800 раз более высокую ЭЛ, чем эталонные светодиоды без графена. Измерения методом ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии показали, что графен вызывает сдвиг работы выхода на поверхности структуры примерно на 0.3 eV. Другими словами, присутствие графена вносило изменения в зонную структуру приповерхностной области, способствующие увеличению излучательной рекомбинации в слое квантовых точек InAs/GaAs [19].

Таким образом, в нашем случае появление ЭЛ при малых токах накачки и ее усиление (по сравнению с контрольными мезадиодами) могут быть связаны с влиянием углеродной пленки на поверхностные состояния GaAs и закрепление уровня Ферми. Механизм этих изменений обусловлен взаимодействием углерода с атомами приповерхностных слоев GaAs (в том числе оксида GaAs). Данное предположение подкрепляется представленными в работе [2] результатами исследований аналогичных углеродных пленок методом вторичной ионной масс-спектрометрии. В частности, обнаружено, что для структуры C-слой/GaAs наблюдается взаимная диффузия атомов C и As. Взаимное проникновение элементов регистрировалось на расстояние до ± 2 nm от номинальной границы раздела для толщины углеродной пленки ~ 11.4 nm.

В заключительной части работы представим результаты исследования поляризационных характеристик электролюминесцентного излучения изготовленных мезадиодов, представляющих собой лабораторные образцы ССИД. Измерения циркулярной поляризации ЭЛ были выполнены по стандартной схеме с использованием четвертьволновой пластины. Магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации излучения исследовались в геометрии Фарадея (магнитное поле направлено перпендикулярно поверхности образцов). Значение

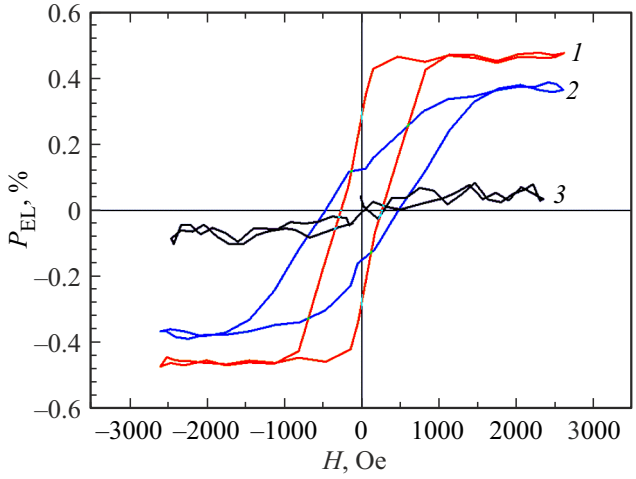

Рис. 7. Магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации излучения изготовленных на основе гетероструктуры B мезадиодов при температуре 10 K. Зависимость *1* соответствует контрольному образцу со слоем $Co_{0.4}Pt_{0.55}$ и туннельно-тонким диэлектриком Al_2O_3, не содержащему C-слой на поверхности структуры (ток накачки 10 mA); зависимость *2* — случаю диода с углеродной пленкой, туннельно-тонким диэлектриком Al_2O_3 и слоем $Co_{0.4}Pt_{0.55}$ (ток накачки 2 mA); зависимость *3* отвечает диоду с углеродной пленкой и слоем $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ (ток накачки 10 mA).

степени циркулярной поляризации ЭЛ оценивалось по формуле

$$P_{EL} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-) \cdot 100\,\%,$$

где $I_+(I_-)$ — интенсивности компонент с левой (правой) поляризацией, полученные путем интегрирования части спектра излучения, отвечающей пику, связанному с переходами в квантовой яме.

Полученные при температуре измерений 10 K магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ ССИД, изготовленных на основе гетероструктуры B, представлены на рис. 7. Прежде всего, видно, что нелинейный с петлей гистерезиса вид магнитополевой зависимости наблюдается только для ССИД, имеющих в своей конструкции слой диэлектрика Al_2O_3 (зависимости *1* и *2* на рис. 7). При этом наибольшие значения (свыше 0.5 % в магнитном поле 1000 Oe) степени циркулярной поляризации достигаются в случае контрольного ССИД, не содержащего C-слоя (зависимость *1*). Наличие углеродного слоя приводит к повышению коэрцитивного поля и снижению степени циркулярной поляризации до значений около 0.3 %. В случае ССИД с углеродной пленкой и осажденным на нее слоем ферромагнитного сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ наблюдается слабая линейная зависимость степени циркулярной поляризации от магнитного поля (зависимость *3* на рис. 7).

Можно выделить следующие причины подобного влияния углеродного слоя на поляризационные характеристики. Углеродный слой, как отмечалось выше, обладает

пассивирующими свойствами и является диффузионным барьером. Следовательно, можно ожидать, что проникновения атомов сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ в полупроводник не происходит. В то же время, совершенно очевидно, изменяются магнитные свойства $Co_{0.45}Pt_{0.55}$. По-видимому, влияние на магнитные свойства пленок, в частности, на ориентацию вектора намагниченности оказывает „зернистая“ морфология углеродной графеноподобной пленки, сформированной ИЛН. Регистрируемые магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации отражают поведение перпендикулярной (к поверхности структуры) составляющей вектора намагниченности. Сравнивая зависимости *1* и *2* на рис. 7, можно заключить, что в присутствии C-слоя на поверхности структуры эта компонента уменьшается, поскольку зависимость $P_{\mathrm{EL}}(H)$ выходит на насыщение при значительно большем поле (~ 1500 Oe) по сравнению с контрольным образцом (~ 150 Oe). В отсутствие туннельно-тонкого диэлектрика Al_2O_3 этот эффект выражается еще сильнее, поэтому гистерезис не наблюдается, и зависимость $P_{\mathrm{EL}}(H)$ не выходит на насыщение в пределах используемого диапазона магнитных полей.

Влияние углеродного слоя на плотность состояний и барьерные свойства мезадиодов с ферромагнитным контактом $Co_{0.45}Pt_{0.55}/Al_2O_3$ или $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ сказывается также на инжекции и релаксации спин-поляризованных носителей и может быть причиной снижения степени циркулярной поляризации ЭЛ излучения.

Заключение

Таким образом, проведенные комплексные исследования изготовленных лабораторных образцов спиновых светоизлучающих диодов показали следующее:

— введение графеноподобного углеродного слоя в структуру ССИД с ферромагнитным инжектором на основе сплава $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ способствует значительному повышению интенсивности ЭЛ светодиодов, снижению их рабочих токов и повышению температур эксплуатации (интенсивное излучение сохраняется вплоть до комнатной температуры);

— наблюдаемое уменьшение степени циркулярной поляризации (по сравнению с контрольным образцом) может быть связано с двумя основными факторами: изменением магнитоструктурных свойств пленки CoPt, сформированной на поверхности образца с C-слоем, и состоянием (шероховатость, резкость, диффузия и т. п.) гетерограниц $CoPt/Al_2O_3$/C-слой/GaAs.

Дальнейшее развитие исследований предполагает определение таких технологических условий применения C-слоев в конструкции инжектирующего контакта, которые бы позволяли, наряду с сохранением высокой интенсивности излучения ССИД, повышать степень его циркулярной поляризации. Поэтому перспектива использования углеродных слоев в конструкции ССИД обусловлена как развитием метода импульсного нанесения (оптимизации технологических параметров формирования C-слоев), так и применением послеростовых обработок (импульсный лазерный отжиг, термический отжиг) углеродных слоев с целью улучшения их структуры и качества границы раздела C-слой/GaAs. Ожидается получение новых возможностей для дальнейшего увеличения интенсивности ЭЛ и управления поляризационными характеристиками ССИД.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность сотруднику Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН М.П. Темирязевой за исследования морфологии углеродных слоев методами атомно-силовой микроскопии и активное участие в обсуждении полученных результатов.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансировании Российским научным фондом (грант №25-29-00368).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] А.В. Здоровейщев, М.В. Дорохин, О.В. Вихрова, П.Б. Демина, А.В. Кудрин, А.Г. Темирязев, М.П. Темирязева. ФТТ, **58** (11), 2186 (2016). DOI: 10.21883/ftt.2016.11.43737.8k [A.V. Zdoroveyshchev, M.V. Dorokhin, O.V. Vikhrova, P.B. Demina, A.V. Kudrin, A.G. Temiryazev, M.P. Temiryazeva. Phys. Solid State, **58** (11), 2267 (2016). DOI: 10.1134/s1063783416110391]

[2] Ю.А. Данилов, М.В. Ведь, О.В. Вихрова, Н.В. Дикарева, М.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, В.А. Ковальский, Р.Н. Крюков, А.В. Кудрин, В.П. Лесников, П.А. Юнин, А.М. Андреев. ФТП, **54** (9), 868 (2020). DOI: 10.21883/ftp.2020.09.49823.15 [Yu.A. Danilov, M.V. Ved', O.V. Vikhrova, N.V. Dikareva, M.N. Drozdov, B.N. Zvonkov, V.A. Koval'skii, R.N. Kryukov, A.V. Kudrin, V.P. Lesnikov, P.A. Yunin, A.M. Andreev. Semiconductors, **54** (9), 868 (2020). DOI: 10.1134/s1063782620090079]

[3] Z. Tao, D. Zhou, H. Yin, B. Cai, T. Huo, J. Ma, Z. Di, N. Hu, Z. Yang, Y. Su. Mater. Sci. Semicond. Process., **111**, 104989 (2020). DOI: 10.1016/j.mssp.2020.104989

[4] X. Yu, Y. Dai, Y. Lu, C. Liu, Y. Yan, R. Shen, Z. Yang, L. Feng, L. Sun, Y. Liu, S. Lin. Adv. Sci., **10**, 2204058 (2023). DOI: 10.1002/advs.202204058

[5] M.V. Dorokhin, O.V. Vikhrova, P.B. Demina, I.L. Kalentyeva, P.S. Vergeles, E.B. Yakimov, V.P. Lesnikov, B.N. Zvonkov, M.V. Ved, Yu.A. Danilov, A.V. Zdoroveyshchev. Appl. Radiation Isotopes, **179**, 110030 (2022). DOI: 10.1016/j.apradiso.2021.110030

[6] O.V. Vikhrova, M.V. Dorokhin, Yu.A. Danilov, V.P. Lesnikov, P.B. Demina, N.V. Dikareva, M.V. Ved', A.V. Zdoroveyshchev, I.L. Kalentyeva, R.N. Kriukov, A.V. Nezhdanov. Opt. Mater., **174**, 117899 (2026). DOI: 10.1016/j.optmat.2026.117899

[7] A.C. Ferrari. Solid State Commun., **143**, 47 (2007). DOI: 10.1016/j.ssc.2007.03.052
[8] A.C. Ferrari, D.M. Basko. Nature Nanotechnology, **8**, 235 (2013). DOI: 10.1038/nnano.2013.46
[9] X. Li, S. Lin, X. Lin, Z. Xu, P. Wang, S. Zhang, H. Zhong, W. Xu, Z. Wu, W. Fang. Opt. Express, **24** (1), 134 (2016). DOI: 10.1364/oe.24.000134
[10] S.J. Zhang, S.S. Lin, X.Q. Li, X.Y. Liu, H.A. Wu, W.L. Xu, P. Wang, Z.Q. Wu, H.K. Zhong, Z.J. Xu. Nanoscale, **8**, 226 (2016). DOI: 10.1039/c5nr06345k
[11] S. Tongay, M. Lemaitre, X. Miao, B. Gila, B.R. Appleton, A.F. Hebard. Phys. Rev. X, **2**, 011002 (2012). DOI: 10.1103/physrevx.2.011002
[12] C.-C. Tang, M.-Y. Li, L.J. Li, C.C. Chi, J.-C. Chen. Appl. Phys. Lett., **101**, 202104 (2012). DOI: 10.1063/1.4767387
[13] U. Khan, N.O. Adesina, J. Xu. Key Engineer. Mater., **907**, 24 (2022). DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.907.24
[14] D.K. Schroder. *Semiconductor material and device characterization* (Wiley, Hoboken, New Jersey, 2006), DOI: 10.1002/0471749095
[15] Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.matprop.ru/GaAs_basic
[16] Z.A. Ansari, T.J. Singh, S.M. Islam, S. Singh, P. Mahala, A. Khang, K.J. Singh. Optik, **182**, 500 (2019). DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.01.078
[17] B.G. Singidas, A.E. De los Reyes, H.R. Bardolaza, J.D.E. Vasquez, A.A. Salvador, E.S. Estacio, R.V. Sarmago. Appl. Phys. Lett., **117**, 171105 (2020). DOI: 10.1063/5.0015145
[18] H.H. Yoon, W. Song, S. Jung, J. Kim, K. Mo, G. Choi, H.Y. Jeong, J.H. Lee, K. Park. ACS Appl. Mater. Interfaces, **11**, 47182 (2019). DOI: 10.1021/acsami.9b12074
[19] Q.N.D. Lung, R.J. Chu, E. Yeon, Y. Kim, M.A. Madarang, W.J. Choi, D. Jung. Adv. Mater. Interfaces, **12**, 2401011 (2025). DOI: 10.1002/admi.202401011