

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук,
Багаева Виктора Сергеевича на диссертацию Мартынова Артема Константиновича
«Формирование в СВЧ плазме алмазных плёнок и композитов, содержащих оптически
активные примеси Si, Ge, Eu», представленную к защите на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика
конденсированного состояния.

Диссертация Мартынова Артема Константиновича посвящена экспериментальным исследованиям синтеза алмазных плёнок в СВЧ плазме и композитов, содержащих оптически активные примеси Si, Ge, Eu. В работе исследовано влияние параметров осаждения легированных кремнием алмазных плёнок на спектральные характеристики центров окраски для развития существующих методов легирования алмаза из силана для получения достаточно узких линий для задач квантовой оптики. Также в работе разработаны метод контролируемого легирования алмаза германием и методы легирования алмаза редкоземельными элементами, которые позволили получить фотолюминесценцию (ФЛ) с высоким соотношением сигнал/шум.

В Главе 1 представлен аналитический обзор литературы по теме исследования. Представлена информация о строении и свойствах алмаза, методах получения и областях применения алмазных плёнок, методах активации газа в CVD процессе. Рассмотрены достоинства и недостатки различных методов получения центров окраски в алмазе, а также перспективы практического использования таких центров. Выявлены проблемы в существующей технологии, поставлены задачи диссертационной работы. В Главе 2 представлено описание и технические характеристики основного оборудования, используемого для синтеза материалов и их дальнейшего исследования. В Главе 3 описано исследование режимов синтеза легированных кремнием поликристаллических алмазных плёнок в СВЧ плазме, способствующих образованию оптически активных дефектов «кремний-вакансия» в алмазе. Описано изготовление набора моноизотопных SiV-центров в слабонапряжённых эпитаксиальных алмазных плёнках легированных изотопически чистым кремнием. В Главе 4 рассмотрено легирование германием поликристаллических алмазных плёнок и гомоэпитетаксиальных монокристаллических алмазных слоёв посредством добавления GeH₄ в реакционную газовую смесь CH₄/H₂ непосредственно в процессе синтеза алмаза из газовой фазы в СВЧ-плазме.

В процессе выполнения работы диссидентом получены важные с фундаментальной и практической точки зрения результаты:

- Методом химического осаждения из газовой фазы в СВЧ плазме были синтезированы поликристаллические и монокристаллические легированные кремнием и германием алмазные плёнки содержащие оптически активные центры, а также композиты на основе алмаза с включениями европия.
- Определены режимы синтеза (концентрация SiH₄/CH₄, температура) легированных кремнием поликристаллических алмазных плёнок в СВЧ плазме, способствующие образованию оптически активных дефектов «кремний-вакансия» в алмазе с интенсивной узкополосной ФЛ на длине волны 738 нм.

- В слабонапряжённых эпитаксиальных алмазных слоях, осаждённых в СВЧ плазме из газовой смеси CH_4/H_2 с добавлением изотопно-обогащённого силана, получены ансамбли SiV-центров с рекордно узкими интегральными компонентами БФЛ в спектрах поглощения и определён изотопический сдвиг компонент БФЛ SiV.
- В микрокристаллических алмазных плёнках, осаждённых в СВЧ плазме из газовой смеси $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{SiH}_4$ на подложки из нитрида алюминия, вольфрама и кремния обнаружены центры с ФЛ в полосе 720-722 нм, интенсивность свечения которых с повышением температуры осаждения растёт опережающим темпом по сравнению с интенсивностью ФЛ SiV и может стать сравнимой с ней.
- Реализовано контролируемое легирование германием поли- и монокристаллических алмазных плёнок. Получены центры окраски GeV с яркой ФЛ на длине волны 602 нм. Найдены условия легирования ($\text{GeH}_4/\text{CH}_4 \approx 10\%$) в диапазоне концентраций 0-36%, которые максимизируют излучение GeV-центров. Осуществлён одновременный рост кристаллитов германия и алмаза.
- Разработан новый метод получения композитов с механически прочной и химически инертной матрицей, сочетающих высокую теплопроводность и прозрачность алмаза с интенсивной фото- и рентгенолюминесценцией от редкоземельных наночастиц. Изготовлены и охарактеризованы композитные материалы с наночастицами EuF_3 и $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$, встроенными в микрокристаллические алмазные плёнки, обладающие яркой фото- и рентгенолюминесценцией на длине волны 612 нм. Установлена концентрационная зависимость интенсивности рентгенолюминесценции от количества нанесённых частиц. Впервые показана возможность применения люминесцентного композита алмаз-РЗЭ в качестве люминесцентных рентгеновских экранов.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, большим количеством синтезированных и проанализированных образцов, воспроизводимостью результатов экспериментов.

Основные результаты диссертации были представлены на всероссийских и международных конференциях, опубликовано 20 тезисов в материалах и сборниках трудов конференций. Основные положения работы опубликованы в рецензируемых научных журналах в 6 статьях, в том числе 5 из них изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 4 входят в базу данных Web of Science.

Полученные соискателем результаты являются новыми и обладают практической значимостью, которая заключается в следующем:

- Получены ансамбли моноизотопных SiV-центров с рекордно узкой полосой люминесценции (полуширина 4,8 ГГц) при помощи контролируемого легирования алмаза кремнием из газообразного силана непосредственно во время плазмохимического синтеза алмазных плёнок.
- Обнаружены и охарактеризованы новые оптические центры в микрокристаллических алмазных плёнках с ФЛ в полосе 720-722 нм.

- Впервые получены центры окраски германий-вакансия в алмазе при использовании газообразного германа в качестве источника примеси, и определены условия синтеза алмаза, обладающего высокой интенсивностью ФЛ центров GeV.
- Впервые из газовой смеси метан-водород-герман получен композитный материал германий-алмаз.
- Получены и охарактеризованы новые алмазные композиты с внедрёнными наночастицами EuF₃ и β-NaGdF₄:Eu в качестве источников ФЛ и РЛ.

Из недостатков работы можно отметить следующие:

1. В работе не обсуждается физический механизм влияния азота на интенсивность люминесценции SiV- центров и центров с бесфононной линией излучения в районе 720-722 нм, обнаруженных автором. В то же время, существенные изменения интенсивности излучения данных люминесцентных центров, вызванные азотом, авторы уверенно наблюдают экспериментально, см. стр. 96 манускрипта.
2. В работе при обсуждении ширин линий излучения люминесцентных центров часто сравниваются величины, приведенные в разных единицах (нанометрах или электрон-вольтах). Данная особенность несколько осложняет чтение манускрипта.
3. В формуле на стр. 96 присутствует опечатка.

Отмеченные недостатки не снижают качество работы и не влияют на основные результаты диссертации. Работа базируется на достаточном числе экспериментальных данных. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация «Формирование в СВЧ плазме алмазных плёнок и композитов, содержащих оптически активные примеси Si, Ge, Eu» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор Мартынов Артем Константинович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Главный научный сотрудник,
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН
д.ф.-м.н.

 Багаев Виктор Сергеевич

