

**Ю. Д. Трондина**

(ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель)

Науч. рук. **А. С. Руденков**, канд. техн. наук, доцент

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА СРЕДСТВАМИ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

Определение фазового состава углеродных покрытий с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния является важной задачей, направленной на получение точной и надёжной информации о структурных и фазовых характеристиках углеродных материалов. Это знание необходимо для оценки свойств покрытий, оптимизации технологий их нанесения и улучшения эксплуатационных характеристик в различных областях применения.

Для начала важно изучить теоретические основы Рамановской спектроскопии, что позволит понять принципы работы этого метода и его возможности в исследовании углеродных материалов. Разные типы углеродных покрытий, такие как графит, алмазоподобный углерод и другие, обладают уникальными спектроскопическими признаками, которые необходимо выявить и проанализировать.

Следующим шагом станет разработка методики измерений, которая включает в себя подбор оптимальных параметров для проведения Рамановских исследований. После этого можно будет провести экспериментальные исследования на образцах покрытий на основе углерода и получить спектры.

Рассеяние света – совокупность физических явлений (отражение, преломление, дифракции), которые влияют на направление распространения света в веществе и могут изменять длину волны света [1].

Типы рассеяния света:

1. Эластичное (упругое) Рэлеевское – без изменения длины волны света.
2. Неэластичное (неупругое) Рамановское – с изменением длины волны света.

Явление комбинационного рассеяния основано на эффекте неупругого рассеяния оптического излучения на молекулах вещества. Это означает, что рассеянный свет отличается по частоте от частоты падающего света в веществах (твёрдых, жидких, газообразных, порошках, взрывных веществах), поэтому этот метод позволяет исследовать структуру вещества [1]. Схематично явление комбинационного рассеяния на подложке изображено на рисунке 1.

Стоксово комбинационное рассеяние (красный спектр) сопровождается увеличением длины волны рассеянного света. Наблюдается в случае, если молекула находится в невозбужденном состоянии и при взаимодействии со светом происходит испускание кванта меньшей энергии, то есть молекула оставляет себе часть энергии, что приводит к её переходу на подуровень выше.

Антистоксово комбинационное рассеяние (голубой спектр) сопровождается уменьшением длины волны рассеянного света. Наблюдается в случае, если молекула находится в возбужденном состоянии и при взаимодействии со светом происходит рассеяние света большей энергии, то есть молекула с высокого колебательного подуровня переходит на нижний подуровень.

Рэлеевское рассеяние (зеленый спектр) – упругое рассеяние света, которое не сопровождается изменением длины волны и частоты.

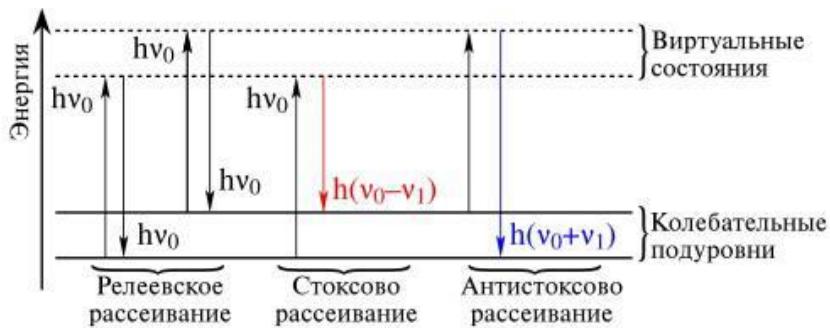


Рисунок 1 – Рассеяние света на подложке

Углеродное покрытие – структура, которая представляет собой комбинации алмазных ( $sp^3$ ) и графитоподобных ( $sp^2$ ) связей. Также известно, что углерод может образовывать множество аллотропных форм из-за своей валентности и иметь три гибридизации:  $sp^3$ ,  $sp^2$  и  $sp$  [2].

Наиболее распространёнными аллотропными формами углерода являются алмаз, графит и аморфный углерод, также существуют фуллерены и карбины.

Покрытия обычно подразделяются на две группы, в зависимости от содержания водорода в структуре:

1. Покрытия, которые получают при помощи графитовых мишней и содержат в своей структуре в основном углерод, называемые аморфным углеродом с преобладающей  $sp^2$  – гибридизацией (a-C) или аморфным алмазом с высоким содержанием (более 50 %)  $sp^3$  – фазы (ta-C) [2].

2. Покрытия, которые получают в результате реакции водорода и углерода. Эти покрытия называют гидрогенизованным аморфным углеродом (a-C:H).

Спектрометр Senterra позволяет проводить измерения спектров комбинационного рассеяния. Он имеет возможность проводить измерения жидких веществ и твердых образцов: стеклообразных, кристаллических, тонких пленок (рисунок 2).

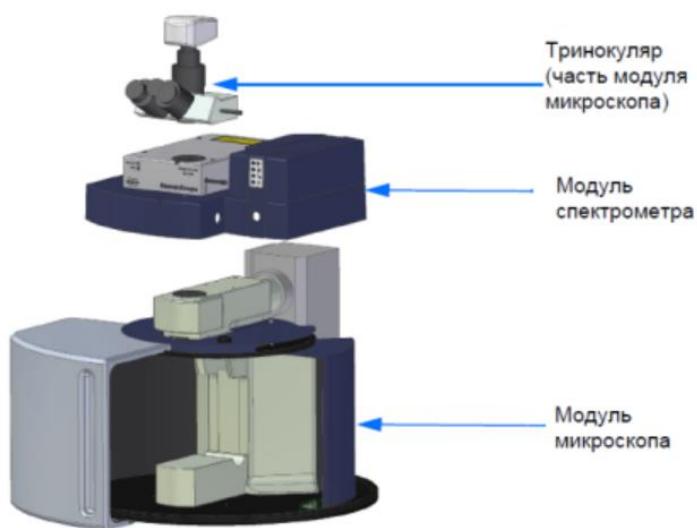


Рисунок 2 – Схематичное изображение спектрометра Senterra

Прибор состоит из микроскопа и спектрометра. Микроскоп оборудован кюветным держателем, который позволяет изучать образцы в жидкой фазе, и микрообъективами от четырёхкратного до стократного увеличения, чтобы исследовать образец вплоть до мельчайших неоднородностей на его поверхности.

Для того, чтобы убрать упруго рассеянный свет, так называемое Рэлеевское рассеяние, используется фильтр. Затем спектр направляется на поворотную турель с двумя дифракционными решётками с шагом 400 и 1200 штрихов/мм и далее рассеянный свет, разложенный в спектр, попадает на регистрирующую систему, после чего мы видим изображение спектра на экране компьютера.

При сравнении спектров различных аллотропных модификаций углерода видна существенная их разница [3]. Так, если наиболее интенсивная полоса в спектре КР у алмаза –  $1332\text{ см}^{-1}$ , то в спектре графита она смещена к  $1582\text{ см}^{-1}$  (рисунок 3).

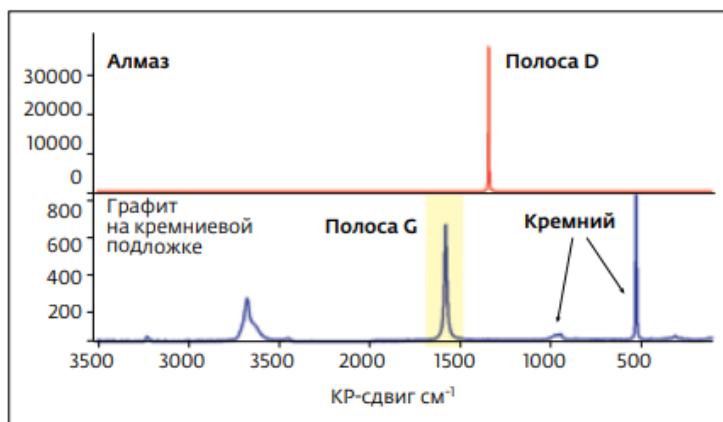


Рисунок 3 – Сравнение КР спектров алмаза и графита

Полоса КР графита  $1582\text{ см}^{-1}$  обычно называется полосой G (от Graphite), полоса алмаза – полосой D (от Diamond). Полоса G смещена, поскольку она относится к углероду в  $\text{sp}^3$  – состоянии в структуре алмаза [3]. Дополнительные полосы в спектре графита указывают на наличие в его структуре различных углерод-углеродных связей.

Таким образом, использование Рамановской спектроскопии для анализа фазового состава углеродных покрытий является эффективным инструментом неразрушающего контроля, позволяющим точно идентифицировать различные аллотропные модификации углерода.

## Литература

1. Разработка и постановка лабораторных работ по курсу «Наноматериалы и нанотехнологии» [Электронный ресурс] / Студбук. – Режим доступа: [https://studbooks.net/1274927/pedagogika/razrabotka\\_i\\_postanovka\\_laboratornyh\\_rabot\\_po\\_kursu\\_nanomaterialy\\_i\\_nanotehnologii\\_](https://studbooks.net/1274927/pedagogika/razrabotka_i_postanovka_laboratornyh_rabot_po_kursu_nanomaterialy_i_nanotehnologii_). – Дата доступа: 15.03.2025.
2. Завидовский, И. А. Влияние параметров импульсно-плазменного осаждения углеродных покрытий на их структуру, электрофизические и антибактериальные свойства: дис. канд. физ.–мат. наук: 1.3.5. / И. А. Завидовский. – М., 2022. – 145 с.
3. Тихомиров, С. Спектроскопия комбинационного рассеяния – перспективный метод исследования углеродных наноматериалов / С. Тихомиров, Т. Кимстач // Аналитика. – 2011. – № 1.