

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



А.Л. Толстик

(подпись)

июль 2015 г.

(дата утверждения)

Регистрационный № УД- 749 /уч.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности
1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий

Минск 2015 г.

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 07-2013; учебных планов №G31-143/уч. и №G31и-179/уч.

СОСТАВИТЕЛЬ:

И.М. Гулис — профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор;

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 11 от 29 апреля 2015 г.);

Советом физического факультета (протокол № 10 от 18 июня 2015 г.).

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа курса «Люминесценция» разработана для специальности **1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий**.

Целью учебной дисциплины является обучение студентов основным закономерностям, экспериментальным проявлениям и принципам практического использования явлений люминесценции в различных областях научной и прикладной деятельности.

Основная задача учебной дисциплины – дать представление о механизмах преобразования энергии в атомных и молекулярных системах, сопровождающихся излучательными переходами, о формировании спектральных, кинетических и поляризационных характеристик люминесценции, которые являются источником информации о протекающих в системах процессах.

Преобразование энергии электронного возбуждения в атомных и молекулярных системах, сопровождающееся спонтанными излучательными переходами, представляет значительный интерес, как с фундаментальной точки зрения, так и в связи с широким использованием явлений люминесценции в научных исследованиях, в медицине, в технике и технологиях. Изучение сложного комплекса процессов, результатом которых является испускание квантов люминесценции, необходимо для понимания механизмов таких важных природных процессов, как фотосинтез, зрение, для понимания механизмов широкого круга фотофизических процессов, протекающих в искусственных системах. Особо значимым является то, что характеристики люминесценции природных и искусственных систем являются самым важным источником информации о процессах, протекающих в этих системах, позволяют получить информацию о динамике преобразования энергии, взаимодействиях, константах скоростей реакций и т.п.

Основные разделы курса дают студентам информацию о формировании спектров поглощения и люминесценции различных атомных и молекулярных систем. Акцент в изложении делается в первую очередь на молекулярную люминесценцию, изучение закономерностей которой позволяет понять особенности формирования люминесцентных характеристик и в системах других типов. Рассматриваются различные типы безызлучательных переходов, процессы тушения люминесценции, квантовые выходы и кинетика люминесценции. Анализируются поляризационные характеристики люминесценции. Значительное внимание уделяется изучению переноса энергии электронного возбуждения, а также механизмам влияния межмолекулярных взаимодействий на спектрально-люминесцентные характеристики. В ходе изложения постоянно акцентируется внимание студентов на областях практического применения люминесценции, на информационных аспектах получаемых в эксперименте характеристик люминесценции.

Материал курса основан на знаниях и представлениях, заложенных в следующих дисциплинах: «Оптика», «Оптические спектры атомов», «Спектроскопия молекулярных и кристаллических структур». Он является базовым

для дисциплин: «Спектроскопия наноструктур», «Методы оптической спектроскопии наноструктур», «Физика лазеров».

Общее количество часов, отводимое на изучение учебной дисциплины — 42, из них количество аудиторных часов — 18. Аудиторные занятия проводятся в виде лекций и семинарских занятий. На проведение лекционных занятий отводится 14 часов, на семинарские занятия — 4 часа.

Форма получения высшего образования — очная, дневная.

Занятия проводятся на 3-м курсе в 6-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине — экзамен (совместно с дисциплиной «Спектроскопия молекулярных и кристаллических структур»).

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. **Введение. Люминесценция как явление. Формирование спектров поглощения и люминесценции.** Определение люминесценции. Типы систем, в которых наблюдается люминесценция. Классификация люминесценции по способам возбуждения. Основные характеристики люминесценции. Информация, получаемая при исследовании люминесценции. Схема уровней энергии сложной молекулы и вероятности переходов. Колебательная релаксация, внутренняя конверсия, интеркомбинационная конверсия. Формирование спектров поглощения и люминесценции.

2. **Закономерности в спектрах люминесценции.** Специфика конденсированной и газовой фаз. Правило Стокса-Ломеля. Зависимость спектров флуоресценции от частоты возбуждения. Правило зеркальной симметрии. Универсальное соотношение Степанова.

3. **Законы затухания и выходы люминесценции.** Экспоненциальное затухание. Время жизни возбужденного состояния и длительность люминесценции. Квантовый и энергетический выход люминесценции. Законы затухания и выходы флуоресценции, зависимость от частоты возбуждения.

4. **Процессы с участием триплетных состояний. Тушение люминесценции.** Фосфоресценция. Термически активированная замедленная флуоресценция. Механизмы тушения люминесценции. Процессы, контролируемые диффузией. Формула Штерна-Фольмера.

5. **Поляризация люминесценции.** Осцилляторная модель. Предельная поляризация люминесценции. Поляризационные спектры по поглощению и испусканию. Вращательная деполяризация люминесценции. Формула Левшина-Перрена. Деполяризация люминесценции при затухании.

6. **Перенос энергии электронного возбуждения.** Индуктивно-резонансный перенос. Теория Ферстера. Обменно-резонансный перенос. Экспериментальные проявления переноса энергии. Гомо- и гетероперенос. Сенсibilизированная люминесценция. Аннигиляционная замедленная флуоресценция. Концентрационная деполяризация люминесценции. Концентрационное тушение.

7. **Спектроскопические проявления межмолекулярных взаимодействий.** Универсальные и специфические взаимодействия. Сольватохромные сдвиги спектров поглощения и люминесценции. Ориентационная релаксация. Температурные зависимости спектров флуоресценции, кинетика мгновенных спектров. Неоднородное уширение спектров. Батохромная люминесценция. Перенос энергии в системах с неоднородным уширением.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	КСР		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Введение. Люминесценция как явление. Формирование спектров поглощения и люминесценции	2						
2	Закономерности в спектрах люминесценции.	2						
3	Законы затухания и выходы люминесценции.	2		2				Устный опрос
4	Процессы с участием триплетных состояний. Тушение люминесценции.	2						
5	Поляризация люминесценции.	2						
6	Перенос энергии электронного возбуждения	2						
7	Спектроскопические проявления межмолекулярных взаимодействий.	2		2				Коллоквиум
		14		4				Экзамен

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. И.М.Гулис, А.И. Комяк. Люминесценция. Мн., БГУ, 2009.
2. Л.В.Левшин, А.М.Салецкий. Люминесценция и ее измерение. М., МГУ, 1989
3. С.Паркер. Фотолюминесценция растворов. М., Мир, 1972
4. В.А.Гайсенюк, А.М.Саржевский. Анизотропия поглощения и люминесценции многоатомных молекул. Минск, БГУ, 1986

Перечень дополнительной литературы

1. П.П.Феофилов. Поляризованная люминесценция атомов, молекул и кристаллов. М., 1959
2. Г.В.Майер, В.И.Данилова. Квантовая химия, строение и фотоника молекул. Томск, ТГУ, 1984
3. В.Л.Ермолаев, Е.Н.Бодунов, Е.Б.Свешникова, Т.А.Шахвердов. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. М., Наука, 1977
4. Б.И.Степанов, В.П.Грибковский. Введение в теорию люминесценции. Минск, 1963
5. Н.Г. Бахшиев. Спектроскопия межмолекулярных взаимодействий. Л., ЛГУ, 1972
6. Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. М.:Мир, 1986.– 231 с.

Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности

1. Коллоквиум по разделам дисциплины.
2. Устные опросы.

Примерный перечень мероприятий для контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине

Перечень разделов для составления заданий коллоквиума

1. Закономерности в спектрах люминесценции
2. Поляризация люминесценции.
3. Перенос энергии электронного возбуждения
4. Спектроскопические проявления межмолекулярных взаимодействий.
5. Законы затухания и выходы люминесценции.

Примерный перечень вопросов для коллоквиума

Основные

1. Определение люминесценции. Типы систем, в которых наблюдается люминесценция. Классификация люминесценции по способам возбуждения. Основные характеристики люминесценции. Информация, получаемая при исследовании люминесценции.
2. Схема уровней энергии сложной молекулы и вероятности переходов. Колебательная релаксация, внутренняя конверсия, интеркомбинационная конверсия.
3. Формирование спектров поглощения и люминесценции
4. Правило Стокса-Ломмеля. Зависимость спектров флуоресценции от частоты возбуждения.
5. Правило зеркальной симметрии.
6. Универсальное соотношение Степанова.
7. Квантовый и энергетический выход люминесценции.
8. Фосфоресценция. Термически активированная замедленная флуоресценция.
9. Тушение люминесценции. Процессы, контролируемые диффузией. Формула Штерна-Фольмера.
10. Осцилляторная модель. Предельная поляризация люминесценции. Поляризационные спектры по поглощению и испусканию.
11. Вращательная деполяризация люминесценции. Формула Левшина-Перрена. Деполяризация люминесценции при затухании. Информация, получаемая из поляризационных измерений.
12. Индуктивно-резонансный перенос. Теория Ферстера.
13. Обменно-резонансный перенос.
14. Гомо- и гетероперенос. Сенсibilизированная люминесценция. Аннигиляционная замедленная флуоресценция.
15. Концентрационная деполяризация люминесценции. Концентрационное тушение.
16. Универсальные и специфические взаимодействия. Сольватохромные сдвиги спектров поглощения и люминесценции. Ориентационная релаксация.
17. Температурные зависимости спектров флуоресценции, кинетика мгновенных спектров, зависимости законов затухания и степени поляризации по спектру испускания.
18. Неоднородное уширение спектров. Батохромная люминесценция.
19. Перенос энергии в системах с неоднородным уширением.

Дополнительные

1. Как изменяется спектр люминесценции при переходе от возбуждения в полосе поглощения $S_0 \rightarrow S_1$ к возбуждению в полосе $S_0 \rightarrow S_2$?

2. Приведите выражение, связывающее время затухания флуоресценции с вероятностями излучательных и безызлучательных переходов.

3. В чем различие между тушением люминесценции первого и второго рода?

4. Объяснить, почему при возбуждении линейно поляризованным светом люминесценция изотропного ансамбля молекул может быть поляризованной.

5. Что требуется для выполнения зеркальной симметрии спектров поглощения и флуоресценции?

6. Почему возможен перенос по индуктивно-резонансному механизму триплет-синглетный (переход с испусканием в доноре запрещен!)?

7. Почему наиболее выраженное длинноволновое смещение спектра флуоресценции растворов сложных молекул в условиях неоднородного уширения при увеличении длины волны возбуждающего света имеет место на длинноволновом краю полосы поглощения?

8. Как изменяется с температурой интенсивность термически активированной замедленной флуоресценции?

9. Как можно приближенно оценить время жизни флуоресценции молекулы, не прибегая к его непосредственным измерениям?

10. Как изменяется время затухания люминесценции при тушении первого рода?

11. Может ли изотропный ансамбль молекул (раствор) излучать поляризованную люминесценцию при возбуждении *неполяризованным* светом?

12. Почему для выполнения зеркальной симметрии спектры люминесценции и поглощения представляют в координатах $\frac{W(\nu)}{\nu^4}$ и $\frac{k(\nu)}{\nu}$ соответственно?

13. По какому механизму разрешен триплет-триплетный перенос энергии?

14. Опишите ход температурной зависимости спектра флуоресценции дипольных молекул в полярном растворителе при понижении температуры.

15. Чем определяется расстояние между максимумами спектров флуоресценции и фосфоресценции?

16. Почему время затухания фосфоресценции существенно больше времени затухания флуоресценции?

17. Как выражается квантовый выход люминесценции через вероятности оптических и безызлучательных переходов?

18. Пусть в растворе имеет место вращательная деполяризация. Как изменится степень поляризации при тушении первого и второго рода?

19. Объяснить, как формируется поляризационный спектр.

20. На каких расстояниях реализуется обменно-резонансный перенос энергии?

21. Как изменяется положение спектра поглощения дипольных молекул в полярном растворителе при понижении температуры? Почему?
22. Как соотносятся формы спектра поглощения и спектра возбуждения люминесценции? Какие условия должны быть выполнены, чтобы эти формы совпадали?
23. Приведите возможно большее число примеров систем, для которых затухание люминесценции является неэкспоненциальным.
24. В чем причина падения кантового выхода при возбуждении в антистоксовой области?
25. Дать качественное объяснение концентрационной деполяризации люминесценции.
26. Можно ли утверждать, базируясь на формуле Левшина-Перрена, что при изменении температуры раствора величина, обратная степени поляризации, линейно растет с температурой?
27. Как зависит от расстояния вероятность переноса по индуктивно – резонансному механизму?
28. Какого типа межмолекулярные взаимодействия имеют место в растворе хлорантрацена в бензоле?

Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать коллоквиум по разделам дисциплины, устные опросы. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Коллоквиум проводятся в письменной форме. На выполнение отводится 90 мин. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать справочные и учебные издания. Оценка проводится по десятибалльной шкале.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается по формуле:

$$\text{текущая} = 0,8 \cdot (0,8 \cdot \text{колл} + 0,2 \cdot \text{устн}) + \text{ПБ} - \text{ШБ},$$

где *текущая* – это оценка текущей успеваемости, *колл* – оценка по десятибалльной шкале за коллоквиум, *устн* – оценка по десятибалльной шкале за устный ответ; *ПБ* – поощерительные баллы, начисляемые за выполнение дополнительных (необязательных) заданий, активность на занятиях

(максимум 2 балла за семестр), *ШБ* – штрафные баллы, которые начисляются за пропуски занятий, систематическое опоздание, нарушение учебной дисциплины.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме экзамена (совместно с дисциплиной «Спектроскопия молекулярных и кристаллических структур»), к экзамену допускаются студенты, чья оценка текущей успеваемости не ниже 4 баллов. Экзаменационная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения рейтинговой оценки по дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и экзаменационной оценки. Итоговая оценка рассчитывается по формуле:

$$\text{итог} = 0,3 \cdot \text{текущая} + 0,7 \cdot \text{экзамен}$$

где *итог* – итоговая оценка, *текущая* – оценка текущей успеваемости, *экзамен* – экзаменационная оценка, 0,3 и 0,7 – весовые коэффициенты текущей успеваемости и экзаменационной оценки соответственно.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Оптика	Кафедра общей физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 12 от 18 июня 2014 г.)
Оптические спектры атомов	Кафедра лазерной физики и спектроскопии	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 29 апреля 2015 г.)
Спектроскопия наноструктур	Кафедра лазерной физики и спектроскопии	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 29 апреля 2015 г.)
Методы оптической спектроскопии наноструктур	Кафедра лазерной физики и спектроскопии	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 29 апреля 2015 г.)
Спектроскопия молекулярных и кристаллических структур	Кафедра лазерной физики и спектроскопии	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 29 апреля 2015 г.)
Физика лазеров	Кафедра лазерной физики и спектроскопии	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 29 апреля 2015 г.)

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО

на ____ / ____ учебный год

№№ пп	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
(протокол № ____ от _____ 20__ г.)

Заведующий кафедрой
лазерной физики и спектроскопии
д.ф.-м.н., профессор

_____ Е.С. Воропай

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета
д.ф.-м.н., профессор

_____ В.М. Анищик