

дует, что при отсутствии гиротропии дифракционная эффективность η осциллирует с изменением ψ . При "включении" гиротропии и увеличении азимута поляризации ψ изменение эффективности дифракции незначительно.

Авторы выражают благодарность В.Н.Белому за обсуждение результатов работы.

Список литературы

- [1] Балахший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М., 1985. 280 с.
- [2] Акустические кристаллы. Справочник // Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Чкалова В.В. и др. / Под ред. Шаскольской М.П. М., 1986. 629 с.
- [3] Глинский А.А. // Опт. и спектр. 1984. Т. 56. Вып. 8. С. 966-967.
- [4] Пилипович В.А., Шербак Ю.М. // Изв. АН БССР. Сер. физ. 1975. № 4. С. 100-104.
- [5] Белый В.Н., Войтенко Н.Г., Кулак Г.В. // ЖПС. 1992. Т. 56. № 5-6. С. 831-836.
- [6] Сорока В.В. // ФТТ. 1977. Т. 19. Вып. 11. С. 3327-3331.
- [7] Кулак Г.В. // Опт. и спектр. 1994. Т. 76. Вып. 6. С. 1027-1029.
- [8] Белый В.Н., Кулак Г.В. // ЖПС. 1991. Т. 54. № 5. С. 803-808.
- [9] Бокуть Б.В., Сердюков А.Н., Федоров Ф.И. // Кристаллография. 1970. Т. 5. № 5. С. 1002-1006.
- [10] Федоров Ф.И. Теория гиротропии. Минск, 1976. 456 с.

07;12

Журнал технической физики, т. 66, в. 9, 1996

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАСТЕНИЯХ

© В.Х.Шпунт, В.Ю.Рудь, Ю.В.Рудь

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 23 июня 1995 г.)

Возбуждения при химических реакциях в ряде случаев вызывают биолюминесценцию, которая несет информацию о процессах, протекающих в клетках на молекулярном уровне $[1-6]$. В связи с обнаружением яркой фотолуминесценции зеленых листьев $[7]$ возникла возможность привлечения излучательной рекомбинации при фотовозбуждении наряду с биолюминесценцией $[1]$ для изучения и диагностики разнообразных процессов жизнедеятельности в растениях. В предлагаемой работе раскрыты физические основы новой возможности выявления закономерности в биологическом мире.

Использованная в работе методика измерений спектров фотолуминесценции подобна описанной в $[7]$. Для возбуждения ФЛ применялось излучение гелий-неонового (ЛГ-75), аргонового (ILA 120-1) и гелий-кадмиевого (ЛПМ-11) лазеров, мощность возбуждающего излучения контролировалась в пределах 5-50 мВт/см² и не вызывала видимых изменений в объектах исследований. Для измерений были выбраны листья *Fragaria vesca* L., находившиеся в биологическом контакте с

Люминесцентные свойства биологических объектов при комнатной температуре

Состояние объекта	$t = 0$		I , отн. ед. ¹	
	$\hbar\omega_m$, эВ	I_1/I_2 ²	$t = 0$	$t = 50$ ч
Живой лист	1.80, 1.67	0.54	460(1.67) 250(1.80)	140 80
Жидкость из листа	1.80, 1.67	2.17	170(1.80)	20
Сухой лист	1.70	0.9	40(1.80)	40

¹ Измерения интенсивности выполнены при идентичных условиях возбуждения ($\hbar\omega_{ex} = 1.97$ эВ, $L \simeq 25$ мВт/см²) В скобках приведена энергия фотонов, при которой регистрировалась ФЛ.

² Отношение интенсивности при $\hbar\omega_1 = 1.80$ эВ к интенсивности при $\hbar\omega_2 = 1.67$ эВ.

материнским растением, и отторгнутые от растений листья, изъятая из этих же растений жидкость, а также подвергнутые длительной сушке ($\simeq 2$ года) листья. Главные результаты выполненных исследований суммированы в таблице и на рис. 1–3. Они состоят в следующем.

1. Для зеленых листьев, находившихся в естественной связи с материнским растением, спектральная зависимость интенсивности стационарной фотолуминесценции (ФЛ) хорошо воспроизводится по всей поверхности листьев, а стационарные значения интенсивности I сохраняются неизменными во времени. Как видно из рис. 1, спектральная зависимость ФЛ зеленых листьев включает две перекрывающиеся полосы с максимумами при $\hbar\omega_1 = 1.80$ и $\hbar\omega_2 = 1.67$ эВ при $T = 300$ К. Спектральный контур ФЛ оказался нечувствительным к энергии возбуждающих фотонов ($\hbar\omega_B \pm 1.97, 2.71$ и 2.815 эВ), а интенсивность возникающего излучения I во всех случаях возрастала пропорционально интенсивности возбуждающего излучения L . Своеобразной для зеленых листьев, находящихся в условиях жизнедеятельности растения, оказалась временная зависимость интенсивности ФЛ. Фрагменты типичных временных зависимостей интенсивности $I(t)$ зеленого листа при возбуждении ФЛ излучением с энергией $\hbar\omega_B = 1.97$ эВ представлены на рис. 1 (кривые 2). Следует подчеркнуть, что характер кривых $I(t)$ был нечувствительным к изменениям $\hbar\omega_B$. Типичная временная зависимость интенсивности ФЛ, наблюдавшейся после включения возбуждающего излучения (рис. 1, кривая 3), содержит как минимум две стадии. На первой стадии происходит резкое понижение интенсивности ФЛ в течение 30...40 с, а после достижения минимума I_{\min} интенсивность ФЛ начинает увеличиваться и стремится к своему некоторому равновесному значению I_{∞} . Как показывают наши исследования, значение I_{∞} полностью обратимо и определяется интенсивностью возбуждающего излучения. Вторая стадия временных зависимостей $I(t)$ оказалась намного медленнее первой стадии понижения и длится обычно несколько десятков минут.

Своеобразной оказывается и реакция листьев на выключение возбуждающего излучения. Если время прекращения освещения действия возбуждающего луча t_r превышает 7–10 мин, то после включения возбуждающего излучения величина исходной интенсивности I_0

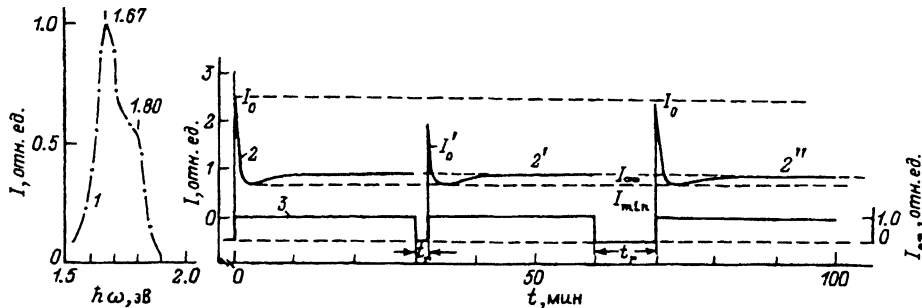


Рис. 1. Спектральная (1) и временная зависимости (2, 2' и 2'') интенсивности ФЛ зеленых листьев *Fragaria vesca* L., находящихся в биологическом контакте с материнским растением, и интенсивности возбуждающего ФЛ излучения (3). $T = 300$ К, $\hbar\omega_B = 1.97$ эВ, t_r — время задержки возбуждающего излучения.

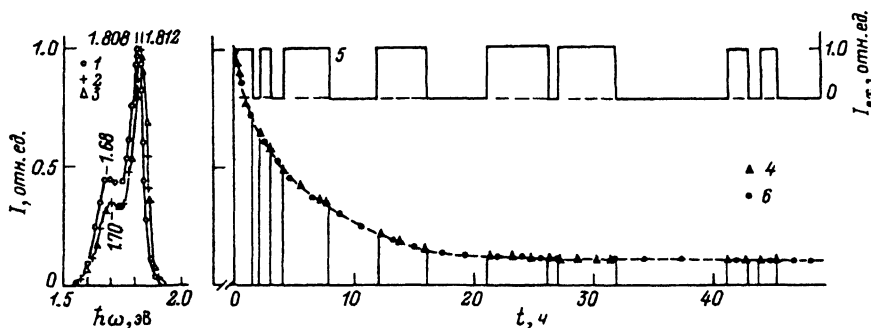


Рис. 2. Спектральные (1-3) и временные (4, 6) зависимости интенсивности ФЛ жидкости, извлеченной из зеленых листьев *Fragaria vesca* L., а также временная зависимость интенсивности возбуждающего ФЛ излучения для кривой 4 (5). $T = 300$ К, $\hbar\omega_B = 1.97$ эВ; время выдержки жидкости после ее извлечения из листьев t , ч: 1 — 0, 2 — 17, 3 — 47.

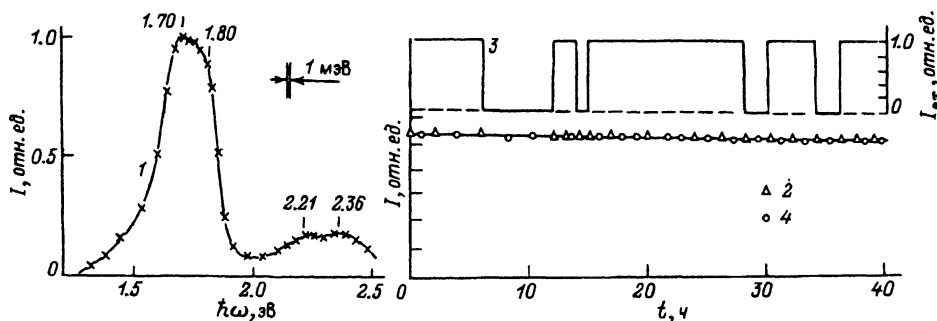


Рис. 3. Спектральная (1) и временные (2, 4) зависимости интенсивности ФЛ отторгнутого от растения сухого (время сушки ~ 1 год) листа *Fragaria vesca* L., а также временная зависимость интенсивности возбуждающего ФЛ излучения для кривой 2 (3). $T = 300$ К, $\hbar\omega_B = 2.815$ эВ.

полностью восстанавливается, а последующая временная зависимость интенсивности ФЛ оказывается идентичной рассмотренной выше. В результате после стадий роста и прохождения минимума интенсивность ФЛ опять достигает уровня равновесного значения I_∞ (рис. 1, кривая 2''). Если же время прекращения возбуждения ФЛ t_r было < 7 мин, тогда исходное значение I_0 оказывалось несколько ниже I_0 , характерного для случая длительного пребывания листьев без лазерного освещения (рис. 1, кривая 2'). Следует подчеркнуть, что для находящихся в биологической связи с материнским растением листьев величина I_∞ не обнаруживала каких-либо признаков деградации. Наблюдаемая временная зависимость интенсивности ФЛ зеленых листьев может рассматриваться как проявление их жизнедеятельности в излучательных процессах. Спад интенсивности ФЛ на первой стадии есть реакция живых листьев на процесс облучения лазерным излучением, тогда как следующая за ней стадия "восстановления" интенсивности ФЛ есть не что иное, как мобилизация жизненных ресурсов растения для подавления "усталости" фотолюминесценции и ее роста до уровня I_∞ при непрерывном освещении лазерным лучом листьев (рис. 1, кривая 2' и 2'', 2') или полного восстановления исходной интенсивности ФЛ I_0 (рис. 1, кривая 2 и 2''), если время прекращения освещения $t_r > 5$ мин. Процесс восстановления I_0 оказался достаточно инерционным и определяется условиями "питания" растения.

2. На рис. 2 приведены спектры ФЛ и временные зависимости интенсивности фотолюминесценции жидкости, извлеченной из зеленых листьев. Спектральный контур фотолюминесценции этой жидкости подобен характерному для зеленого листа (рис. 1), он включает два конкурирующих максимума с близкими для зеленых листьев значениями $h\nu_1$ и $h\nu_2$ (рис. 2, кривая 1), но при этом имеется различие в соотношении интенсивностей этих составляющих I_1/I_2 (см. таблицу).

С ростом времени выдержки жидкости, как видно из рис. 2 (кривые 4 и 6), наступает процесс снижения интенсивности ФЛ. Этот процесс тушения протекает независимо от характера освещения жидкости лазерным излучением. С включением и выключением лазерного возбуждения (рис. 2, кривая 5) интенсивность ФЛ практически мгновенно достигает своего стационарного значения, временная зависимость которого оказывается нечувствительной к характеру освещения (рис. 2, кривые 4 и 6), как это было и в случае зеленых листьев, находившихся в процессе жизнедеятельности (рис. 1, кривые 2, 2' и 2''). Для временной зависимости фотолюминесценции, выведенной из живого растения жидкости и отключенной по этой причине от процесса жизнедеятельности растения жидкости полностью отсутствует характерная для "живущего" листа стадия увеличения интенсивности ФЛ до уровня I_0 или I_∞ . Как видно из рис. 2 (кривые 4 и 6), для фотолюминесценции жидкости характерна только стадия снижения интенсивности с ростом времени ее выдержки. При этом в спектральном контуре ФЛ жидкости происходят необратимые изменения (рис. 2, кривые 2 и 3). Они состоят в тушении длинноволновой составляющей ФЛ и одновременном смещении пиков ФЛ в коротковолновую область спектра.

Как видно из таблицы, интенсивность ФЛ жидкости оказывается существенно ниже, чем в живом растении, а понижение интенсивности ФЛ жидкости оказывается необратимым и более значительно, чем

для живых растений (рис. 1). Следовательно, выведенная из растения жидкость хотя и имеет сходный с живым растением контур ФЛ, однако ее интенсивность необратимо падает со временем выдержки. Это может быть следствием того, что выведенная из процесса жизнедеятельности растения жидкость не обладает способностью реагировать на режим освещения и восстанавливать интенсивность ФЛ.

3. На рис. 3 суммируются типичные результаты исследований люминесцентных свойств отторгнутого от материнского растения листа *Fragaria vesca* L., который находился в сухом состоянии в течение 1 года. Абсолютный максимум интенсивности ФЛ реализуется в той же спектральной области, что и для "живых" листьев (рис. 1, кривая 1), однако для сухих листьев уже не проявляется тонкая структура спектров ФЛ и дополнительно возникает коротковолновая, растущая со временем сушки компонента фотолюминесценции.

Наиболее ярко отличие неживого засушенного листа от живущего проявилось при изменении временных зависимостей интенсивности ФЛ (рис. 3, кривая 2 и 4). Видно, что как при стационарном освещении, так и при всевозможных изменениях во времени режимов освещения сухих листьев возбуждающим лазерным излучением интенсивность фотолюминесценции сохраняется неизменной. Следовательно, исчезновение временной зависимости интенсивности ФЛ в сильно высушенных листьях со всей очевидностью свидетельствует в пользу того, что реакция живых листьев на возбуждающее фотолюминесценцию лазерное излучение может быть полностью отнесена на счет процессов жизнедеятельности растения, которые направлены на "восстановление" вызванных лазерным возбуждением изменений в излучательном процессе. Следует также подчеркнуть, что интенсивность излучательных переходов (см. таблицу) в результате отторжения и сушки листьев сильно падает. Следовательно, именно процесс жизнедеятельности растений обеспечивает обнаруженную в [1] яркую фотолюминесценцию растений в видимой области, тогда как прекращение процесса жизнедеятельности приводит к падению интенсивности ФЛ. Обнаруженная здесь чувствительность люминесценции к протеканию процессов жизнедеятельности в растениях указывает на возможность применения люминесцентных методов для изучения метаболических процессов в объектах биологического происхождения.

Список литературы

- [1] *Физическая энциклопедия* / Под ред. А.М. Прохорова. Сов. энциклопедия. Т. II. М., 1990.
- [2] *Левшин В.Л.* Фотолюминесценция жидких и твердых веществ. М.; Л., 1954.
- [3] *Тарасов Н.И.* Биолюминесценция моря. М., 1969.
- [4] *Волькенштейн М.В.* Биофизика. М., 1981.
- [5] *Гительзон И.И.* Живой свет океана. М., 1976.
- [6] *Красовицкий Б.М., Болотин Б.М.* Органические люминофоры. 2-е изд. М., 1984.
- [7] *Шпунт В.Х., Рудь Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 13. С. 56-59.