

09,15

# Флуоресцентные свойства композитного материала на основе нематического жидкого кристалла 5СВ с наночастицами золота

© Ю.П. Пирятинский, А.Ю. Вахнин, А.Б. Вербицкий, А.К. Кадащук

Институт физики НАН Украины,  
Киев, Украина

E-mail: yuriryat@iop.kiev.ua

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 20 апреля 2011 г.)

Изучены стационарные и разрешенные во времени спектры флуоресценции *n*-пентил-*n*'-цианобифенила и композитного материала на его основе с наночастицами золота в жидкокристаллическом и твердом состояниях. Введение наночастиц золота в жидкий кристалл приводило к заметному тушению флуоресценции в области излучения преддимерных и эксимерных состояний цианобифенила. В твердой фазе наблюдались тушение свободных экситонов и коротковолновый сдвиг полос флуоресценции.

Работа выполнена в рамках проекта НАН Украины № 10/07-Н „Исследования физических свойств наноматериалов для электроники, фотоники, спинтроники и информационных технологий“.

## 1. Введение

Металлические наночастицы, такие как наночастицы золота или серебра, характеризуются поверхностными плазмонными резонансами в видимой области спектра, которые индуцируют сильные локальные электромагнитные поля вблизи поверхности наноструктурированного металла. В последние годы наблюдается значительный интерес к использованию металлических наночастиц для модификации оптических свойств функциональных органических материалов с целью увеличения эффективности оптоэлектронных устройств на основе органических полупроводников. Например, недавно было показано, что наноструктурированный металлический катод в органических светоизлучающих диодах улучшает эффективность таких устройств [1] по сравнению с диодами со сплошными гладкими электродами, которые приводят только к нерадиационному тушению экситонов вблизи поверхности металла. Также недавно было обнаружено увеличение эффективности tandemных органических солнечных элементов при использовании в них наночастиц серебра в качестве промежуточного рекомбинационного слоя [2] и было показано, что это связано с нерезонансным усилением поглощения органических пленок даже при длинах волн, существенно отличающихся от длины волны плазмонного резонанса наночастиц. Последний эффект может иметь большое практическое значение для создания высокоэффективных органических фотовольтаических устройств на основе планарных структур. Дело в том, что квантовая эффективность таких устройств, как правило, ограничивается малой длиной диффузионного смещения экситонов (порядка 5–10 nm) из-за аморфной структуры органических пленок; поэтому только экситоны, которые герерируются на таком расстоянии от границы раздела, дают вклад в фотовольтаический эффект. С другой стороны, органическая пленка толщиной 5–10 nm обычно поглощает только незначительную часть падающего света, поэтому идея

усиления поглощения сверхтонких органических пленок с помощью металлических наночастиц является очень привлекательной и актуальной. Положительная роль металлических наночастиц в увеличении эффективности органических солнечных элементов отмечалась также и для объемных (непланарных) гетероструктур [3], однако механизм наблюдаемого эффекта остается дискуссионным, а сам эффект плохо воспроизводимым.

Влияние металлических наночастиц на люминесцентные свойства органических материалов сегодня еще малоизучено. Предполагается, что люминесценция органических молекул в присутствии металлических наночастиц может либо тушиться, либо усиливаться в зависимости от многих факторов, таких как, например, размер и форма частиц, ориентация дипольного момента перехода органических молекул по отношению к направлению поляризации плазмонных возбуждений наночастиц, квантового выхода люминесценции и скорости радиационной деактивации органических молекул [4]. Усиление интенсивности люминесценции органических молекул может происходить из-за усиления локального электромагнитного поля металлической частицей в соответствии с данными теоретических исследований этого явления [5]. С другой стороны, люминесценция молекул, расположенных непосредственно на металлической поверхности, обычно показывает значительное тушение [6] из-за резонансной передачи энергии возбуждения к металлу или процессов диссоциации экситонов на границе раздела с металлом. Экспериментально для организации пленок с металлическими наночастицами действительно наблюдалось как усиление, так и тушение люминесценции [6–10]. Во многих случаях, особенно для некоторых органических сопряженных полимеров [10], наблюдаемое усиление люминесценции связывалось главным образом с косвенным действием наночастиц, а именно — изменением морфологии (микроструктуры) таких композитных полимерных материалов при введении металлических наночастиц.

Исходные полимерные пленки на основе, например, производных политиофенов характеризуются плотной упаковкой полимерных цепей, что является причиной их низкого квантового выхода люминесценции. Добавка металлических наночастиц, играющих роль прокладок между полимерными цепями, приводит к увеличению среднего расстояния между сегментами (они играют роль хромофоров) соседних цепей и соответственно к росту квантового выхода люминесценции [10]. Далее, во многих композитных системах остается невыясненным вопрос, является ли наблюдаемое увеличение интенсивности люминесценции следствием увеличения квантового выхода люминесценции органических пленок или играет роль также увеличение заселенности экситонных состояний благодаря увеличению поглощения иленок и передаче энергии плазмонных возбуждений к органическому материалу.

Настоящая работа посвящена исследованию роли металлических наночастиц на люминесцентные свойства жидких кристаллов (ЖК). Жидкие кристаллы по своим морфологическим свойствам занимают промежуточное положение между молекулярными кристаллами и изотропными жидкостями. ЖК обладают молекулярной подвижностью жидкостей, сохраняя характерный для кристаллов ориентационный, а в ряде случаев и трансляционный порядок. Заметим, что при оптическом возбуждении в жидких кристаллах возникают молекулярные экситоны, излучательная дезактивация которых приводит к флуоресценции (ФЛ) [11]. Общим подходом для изменения свойств ЖК, в частности оптических и электрических, является введение примесей различных органических соединений, в случае оптических свойств — чаще всего молекул красителей. Тем не менее на протяжении последних 15–20 лет предпринимались неоднократные попытки использования неорганических частиц микро- и нанометровых размеров (например, аэросила [12], ферромагнетиков [13]) для модификации структуры ЖК, получения необычной комбинации свойств, а в результате — новых эффектов (например, различных эффектов „памяти“ и переключения). При этом практически отсутствуют работы, посвященные влиянию наноразмерных металлических частиц на свойства ЖК, что отчасти объясняется сложностью их получения и введения в объем ЖК. Кроме общего интереса к возможности использования ЖК как матрицы для металлических частиц у композитного материала такого типа можно ожидать достаточно высокую чувствительность к внешним электрическим и магнитным полям благодаря свойствам матрицы ЖК, а также к оптическим полям благодаря обоим компонентам, что может оказаться важным для использования в электрооптике и нелинейной оптике. Введение металлических наночастиц в жидкокристаллическую матрицу может приводить к ряду интересных свойств, связанных со взаимодействием молекулярных экситонов и наночастиц металла при лазерном возбуждении вне спектральной области плазменных колебаний в наночастицах. В настоящей работе

нами исследовано влияние наночастиц золота на флуоресценцию модельного ЖК *n*-пентил-*n'*-цианобифенила (5CB) в твердом и жидкокристаллическом состоянии при лазерном возбуждении в ближней УФ-области.

## 2. Экспериментальная часть

2.1. Объекты исследований. В качестве матрицы для нанокompозитного материала мы использовали жидкий кристалл *n*-пентил-*n'*-цианобифенил производства фирмы Merck. Это вещество имеет нематическую фазу в области температур 22.5–35.5°C. Известно, что 5CB при температуре ниже 22.5°C кристаллизуется, а при температуре больше 35.5°C переходит в изотропное состояние. Исходные наночастицы золота диаметром от 3.5 до 5.5 nm находились в форме устойчивой суспензии в толуоле. Этот раствор смешивался с жидким кристаллом и для удаления толуола выдерживался в течение нескольких часов при температуре 80°C. Весовое содержание наночастиц золота в конечной смеси составляло 1 или 2.5%. Затем полученный композит вводился в кварцевую микрокювету толщиной 10  $\mu\text{m}$ , одинаковую для всех исследованных образцов.

2.2. Экспериментальные методы. Стационарные и разрешенные во времени спектры ФЛ регистрировались с помощью решеточного монохроматора МДР-12 (ЛОМО, Россия) с фотоэлектрической приставкой и записью в компьютер. Спектральная ширина щели при измерении спектров ФЛ составляла 0.2–0.4 nm. Флуоресценция возбуждалась излучением азотного лазера с длиной волны  $\lambda_e = 337.1$  nm, длительностью импульса 9 ns, частотой их повторения 100 Hz и мощностью излучения в импульсе 5 kW. Для регистрации разрешенных во времени спектров ФЛ и кинетики ФЛ при фиксированной длине волны использовалась стробоскопическая система с „временным окном“, равным 0.1 ns. Она позволяла записывать спектры ФЛ с различной временной задержкой  $t_d$  относительно начала лазерного импульса. Разрешение установки по времени не превышало 0.7 ns и определялось временем нарастания переднего фронта лазерного импульса. Образец находился внутри оптического гелиевого криостата с возможностью регулировки температуры. Измерения спектров ФЛ были проведены при температурах 298 и 4.2 K.

## 3. Результаты эксперимента

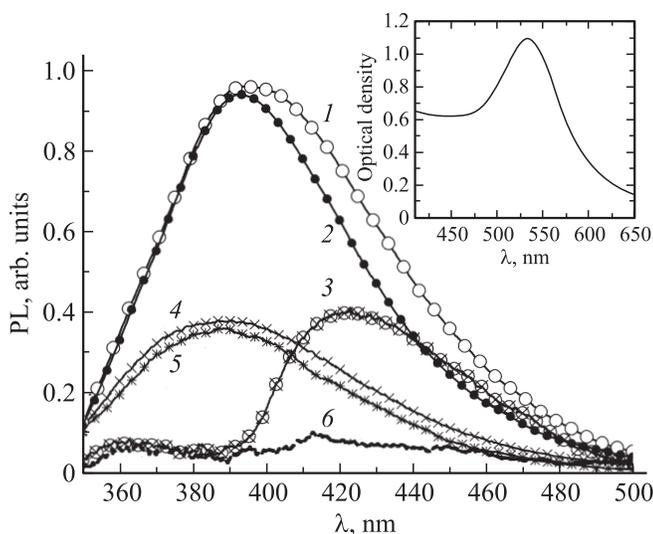
На рис. 1 приведены стационарные и разрешенные во времени спектры ФЛ нематического жидкого кристалла 5CB при 298 K в чистом виде и после введения наночастиц золота в матрицу ЖК. В стационарном спектре ФЛ 5CB (кривая 1) наблюдается широкая бесструктурная полоса с максимумом при 396 nm и слабым плечом при 370 nm. При измерении спектров ФЛ с задержкой  $t_d = 0.7$  ns основная полоса ФЛ (кривая 2) несколько смещена в коротковолновую сторону и ее максимум

находится при 393 nm, а при увеличении задержки до 10 ns в спектре 3 доминирует полоса с максимумом при 422 nm.

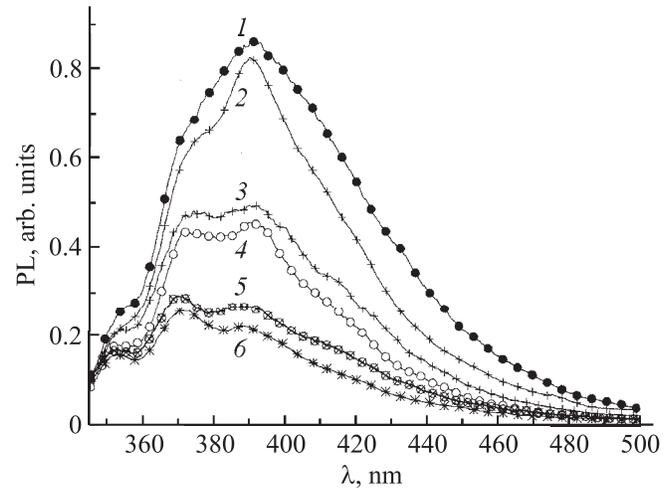
На рис. 1 (вставка) приведен также спектр собственного поглощения раствора наночастиц золота в 5СВ (концентрация 0.02 mg/mol), которое связано с плазмонными возбуждениями в металле, лежит в области 400–650 nm и имеет вид широкой асимметричной бесструктурной полосы с максимумом около 533 nm.

Для раствора 5СВ с наночастицами золота наблюдается интенсивное тушение ФЛ (рис. 1, кривые 4–6). При этом общий вид спектра и положение его максимума для стационарной (4) и измеренной с задержкой  $t_d = 0.7$  ns (5) ФЛ существенно не меняются: в них преобладает широкая полоса с максимумом 390 nm, в то время как в спектре ФЛ с задержкой  $t_d = 10$  ns (6) сигнал практически отсутствует.

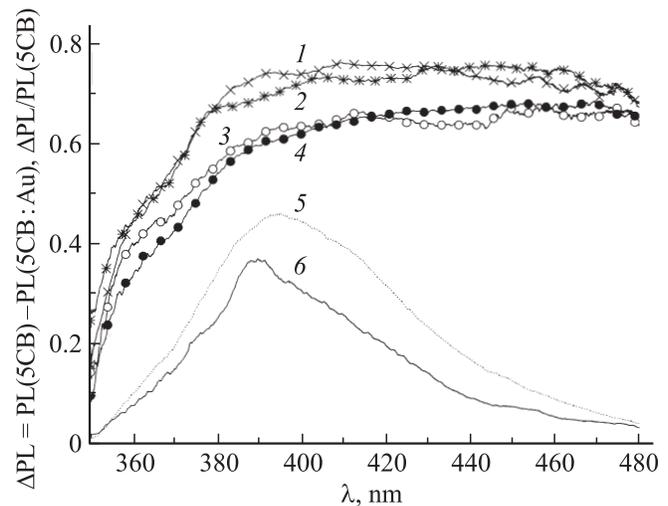
На рис. 2 приведены стационарные и разрешенные во времени спектры ФЛ образцов чистого 5СВ в поликристаллическом состоянии и композита с 1 wt.% (3, 4) и 2.5 wt.% наночастиц золота. Все спектры ФЛ измерялись при  $T = 4.2$  K и в сравнении со спектрами при  $T = 298$  K имеют тонкую структуру, хотя их общий вид подобен как для чистого 5СВ, так и для композита. В стационарном (кривая 1) и измеренном с задержкой  $t_d = 0.7$  ns (кривая 2) спектрах ФЛ чистого 5СВ можно выделить полосы с максимумами при 355, 375 и 391 nm. В спектрах ФЛ композита (кривые 3–6) можно отметить полосы с максимумами при 352, 371 и 388 nm, при этом наблюдается сильное и неоднородное по спектру тушение ФЛ, причем величина этого эффекта зависит от концентрации наночастиц золота. Кроме того, наблюда-



**Рис. 1.** Стационарные (1, 4) и разрешенные во времени (2, 3, 5, 6) спектры ФЛ жидкого кристалла 5СВ (1–3) и композита 5СВ–наночастицы золота (4–6) при  $T = 298$  K.  $t_d$ , ns: 2, 5 — 0.7, 3, 6 — 10. Весовая концентрация наночастиц золота равна 2.5%. На вставке — спектр поглощения раствора наночастиц золота в ЖК (концентрация 0.02 mg/ml).



**Рис. 2.** Стационарные (1, 3, 5) и разрешенные во времени (2, 4, 6) спектры ФЛ чистого 5СВ (1, 2) и композита 5СВ с наночастицами Au (3–6) в кристаллическом состоянии при  $T = 4.2$  K,  $t_d = 0.7$  ns (2, 4, 6). Концентрация наночастиц золота равна 1 (3, 4) и 2.5 wt.% (5, 6).



**Рис. 3.** Спектральная зависимость относительного  $\Delta PL = PL(5CB) - PL(5CB: Au)$  (1–4) и абсолютного  $\Delta PL/PL(5CB)$  (5, 6) тушения ФЛ 5СВ после введения наночастиц золота при температуре 4.2 (1, 2, 6) и 298 K (3–5) для измеренных с задержкой  $t_d = 0.7$  ns (1, 3) и стационарных (2, 4) спектров. Весовая концентрация наночастиц золота в 5СВ равна 2.5%.

ется коротковолновое смещение максимумов всех полос ФЛ приблизительно на  $140 \text{ cm}^{-1}$  как в стационарном (кривая 5), так и в разрешенном во времени (кривая 6) спектре композита.

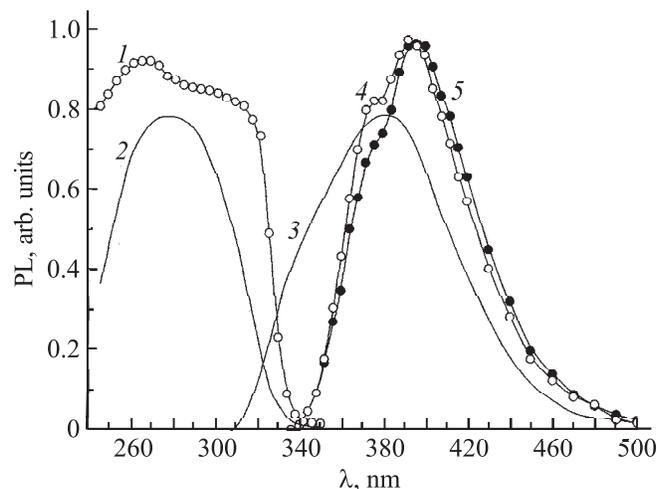
На рис. 3 приведены спектральные зависимости абсолютной и относительной (определяются как  $\Delta PL = PL(5CB) - PL(5CB: Au)$  и  $\Delta PL/PL(5CB)$ , где  $PL$  — интенсивность флуоресценции) величины тушения сигнала ФЛ под влиянием введения наночастиц золота в матрицу

5СВ для жидкокристаллического и поликристаллического состояний при измерении как в стационарном режиме, так и с задержкой  $t_d = 0.7$  ns. Видно, что кривые 1–4, а также кривые 5 и 6 имеют подобный ход независимо от режима измерения и фазового состояния матрицы 5СВ: относительная величина тушения ФЛ достигает максимального значения при длине волны около 390 nm и при дальнейшем ее возрастании выходит на насыщение. Следует отметить, что спектральные зависимости абсолютной величины тушения ФЛ 5СВ наночастицами золота в двух кристаллических состояниях, несмотря на структурный спектр ФЛ 5СВ при 4.2 К, также похожи и имеют максимум около 390 nm.

#### 4. Обсуждение

Люминесцентные свойства достаточно толстых слоев 5СВ в состоянии жидкого, твердого кристалла и изотропной жидкости активно изучались несколькими группами авторов [14–16], а также нами [11,17] на протяжении ряда лет. Исследования показали, что сложная структура спектра ФЛ данного вещества может быть объяснена комбинацией свечения мономеров, димеров и эксимеров 5СВ, причем излучение последних определяется несколькими типами преддимерных состояний, которые характеризуются различной стереометрией и энергией взаимодействия молекул в паре.

В спектрах ФЛ сильно разбавленных растворов 5СВ в ацетонитриле [14–16] была зарегистрирована полоса с максимумом  $\lambda_{PL} = 340$  nm, обусловленная излучением собственно молекул (мономеров) 5СВ. В концентрированных растворах мономерная ФЛ проявляется только как коротковолновое плечо широкой полосы с максимумом при  $\lambda_{PL} = 380$  nm, которая соответствует свечению молекулярных ассоциатов, в первую очередь эксимеров [14]. Спектр ФЛ молекулярного слоя 5СВ, адсорбированного на кварцевой подложке, предварительно покрытой нефлуоресцирующим ориентантом, подобен спектру концентрированного раствора 5СВ (рис. 4, кривая 3), а в его спектре возбуждения ФЛ доминирует полоса с максимумом 280 nm (рис. 4, кривая 2). В электронных спектрах поглощения растворов 5СВ в циклогексане [16], ацетонитриле [15] и тонких слоев 5СВ в изотропной фазе [14] ранее было обнаружено две полосы с максимумом в области 220 и 280 nm. Напомним, что в работе [16] принято следующее отнесение наблюдаемых полос в электронных спектрах поглощения цианобифенилов: переход в области 280 nm соответствует  $^1L_a$ -состоянию и поляризован параллельно длинной оси молекулы, тогда как переход в области 220 nm поляризован перпендикулярно длинной оси молекулы и соответствует  $^1L_b$ -состоянию. Как видно, длинноволновая полоса поглощения разбавленных растворов совпадает по положению со спектром возбуждения ФЛ молекулярного слоя 5СВ, а следовательно, излучение молекулярных форм цианобифенила происходит из  $^1L_a$ -состояния [16].



**Рис. 4.** Спектры возбуждения ФЛ (1, 2) и стационарной ФЛ (3–5) 5СВ для молекулярного слоя (2, 3) и в жидкокристаллической фазе (1, 4, 5) при  $T = 298$  К. Длины волн, на которых регистрируются спектры возбуждения ФЛ, nm: 1 — 375 и 396, 2 — 340 и 380. Длины волн возбуждения ФЛ, nm: 3 — 280, 4 — 310, 5 — 260.

Согласно рентгеноструктурным данным [18], молекулы цианобифенила в жидкокристаллической и твердой фазах образуют преддимерные centrosymmetric структуры с расположением молекул цианобифенила по принципу „голова к хвосту“, что приводит к расщеплению полосы поглощения в области 280 nm [14]. Аналогичное расщепление наблюдается при регистрации спектров возбуждения ФЛ жидкого кристалла 5СВ на длинах волн 375 и 396 nm (рис. 4, кривая 1) в виде сложной полосы с максимумами при 265 и 310 nm. При возбуждении ФЛ на длине волны 310 nm (рис. 4, кривая 4) в спектре ФЛ жидкого кристалла 5СВ наблюдаются полосы с максимумом на 375 и 394 nm, а при возбуждении ФЛ на длине волны 260 nm (кривая 5) имеет место уменьшение интенсивности полосы с максимумом 375 nm и рост длинноволновой полосы со смещением ее максимума до 396 nm. Таким образом, возбужденные состояния агрегатов 5СВ не только в твердом, но и в жидкокристаллическом состоянии существуют в виде молекулярных экситонов. Теоретическая модель [19] приписывает голубой сдвиг максимума полосы поглощения в системах линейных хромофоров образованию H-агрегатов, цепочек из десятков или сотен молекул 5СВ, связанных ван-дер-ваальсовым взаимодействием, причем дипольные моменты переходов в них параллельны друг другу и перпендикулярны направлению зацепления фенольных колец.

Важно, что в основном состоянии молекула 5СВ имеет неплоскую форму с углом закручивания вокруг длинной оси до  $30^\circ$ , что создает определенные стерические ограничения для димеризации, удерживая молекулы на значительном расстоянии. В возбужденном состоянии молекула 5СВ может иметь как планарную,

так и „закрученную“ конформацию [11,16], что приводит к усилению взаимодействия в парах и образованию эксимеров. Для 5СВ в мезоморфном и изотропном жидком состояниях ФЛ обусловлена излучением из различных преддимерных состояний молекул в парах при упаковке типа „сэндвич“ [11,14,17], которым соответствуют полосы с максимумами 375, 396 и 422 nm. Особенности поведения последней полосы характерны для классических эксимеров [11]: при комнатной температуре она имеет большое время жизни ( $\tau = 12$  ns), а при низких температурах, когда ротационные степени свободы молекул заморожены, вообще не наблюдается в явном виде (рис. 1, 2).

В отличие от фосфоресценции, которая излучается из плоской конформации молекулы, флуоресценция 5СВ подобно бифенилу может наблюдаться из произвольной конформации молекулы. Таким образом, полосу с максимумом 340 nm, наблюдаемую в спектрах ФЛ растворов и адсорбированных слоев в виде „плеча“ (рис. 4), можно приписать излучению „закрученной“ конформации цианобифенила. В твердокристаллической фазе ей соответствует слабая полоса в области 355 nm (рис. 2). Исследование спектров ФЛ 5СВ с высоким временным разрешением [14,20] показало, что при задержке  $t_d$  от 0 до 170 ps в спектрах ФЛ наблюдается только полоса с максимумом 359 nm. С увеличением задержки интенсивность ее спадает и появляется полоса с максимумом 396 nm, а при  $t_d > 400$  ps эти две полосы уже имеют сравнимую интенсивность. Для возбуждения полосы с максимумом 396 nm необходима некоторая дополнительная энергия, поскольку ее интенсивность возрастает при увеличении энергии фотона возбуждающего света (рис. 4, кривые 4 и 5). Вполне вероятно, что избыточная энергия электронной подсистемы молекулы расходуется на переход молекулы 5СВ из „закрученной“ в плоскую конформацию с последующим излучением или образованием эксимеров. В твердой фазе излучению плоской конформации цианобифенила можно соотнести полосу ФЛ с максимумом 390 nm (рис. 2, кривые 1, 2).

Полоса ФЛ с максимумом около 375 nm наблюдается как в стационарных, так и в разрешенных во времени спектрах ФЛ ( $t_d < 0.7$  ns) при комнатной и гелиевой температурах, что указывает на неактивационный характер этого излучения, а следовательно, оно не связано с эксимерами. Предполагается, что эта полоса соответствует молекулярным парам с взаимодействием в основном состоянии более сильным, чем в преддимерных парах, которые являются предшественниками эксимеров. По-видимому, такие пары являются физическими димерами, которые хорошо описаны в литературе, посвященной именно жидкому кристаллу 5СВ [11,17].

Для композита на основе 5СВ с наночастицами золота при комнатной температуре наиболее сильное тушение наблюдается в области флуоресценции эксимеров. Поскольку это излучение формируется через возбужденные состояния мономеров, можно предположить, что безызлучательный перенос энергии от молекул ЖК к

наночастицам золота эффективно конкурирует с образованием эксимеров из преддимерных состояний. Из спектральной зависимости тушения ФЛ в слое композита (рис. 3) следует, что наиболее сильно эффект тушения ФЛ наночастицами золота выражен в области полосы с максимумом 390 nm. Дело в том, что, находясь в возбужденном состоянии и имея планарную конформацию, молекула 5СВ обладает значительным дипольным моментом и эффективно взаимодействует с металлической наночастицей. При этом скорость безызлучательной передачи энергии от цианобифенила к металлу превышает скорость излучательной релаксации возбужденной молекулы или образования эксимерного состояния. Эффективность передачи энергии от матрицы 5СВ к наночастицам металла и тушения ФЛ также определяется тем обстоятельством, что широкий спектр плазмонных возбуждений в наночастицах металла (вставка на рис. 1) перекрывается по энергии со спектром излучения различных молекулярных форм цианобифенила.

В твердой фазе при низкой температуре в композите 5СВ с золотом наряду с тушением излучения наблюдается коротковолновое смещение полос ФЛ, до  $170 \text{ cm}^{-1}$  (рис. 2, кривые 5, 6), причем оба эффекта можно объяснить преимущественным переносом энергии димерных и преддимерных возбужденных состояний молекул 5СВ, которые находятся в непосредственном контакте с наночастицами золота.

## 5. Заключение

Выявлено, что введение наночастиц золота в жидкий кристалл 5СВ приводит к значительному тушению флуоресценции матрицы как в мезофазе, так и в твердом кристаллическом состоянии. Этот эффект наиболее сильно выражен в спектральной области излучения эксимеров, а также преддимерных состояний цианобифенила и обусловлен безызлучательным переносом энергии возбуждения от молекулярных ассоциатов 5СВ к металлическим наночастицам с высокой эффективностью, которая определяется значительным дипольным моментом молекулы 5СВ в возбужденном состоянии и сильным его взаимодействием с металлом, а также перекрыванием неоднородно уширенного спектра плазмонных возбуждений в наночастицах золота со спектром излучения различных надмолекулярных форм цианобифенила.

## Список литературы

- [1] J.W. Park, M.H. Ullah, S.S. Park, C.S. Ha. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **18**, 393 (2007).
- [2] B.P. Rand, P. Peumans, S.R. Forrest. *J. Appl. Phys.* **96**, 7519 (2004).
- [3] K. Kim, D.L. Carrolla. *Appl. Phys. Lett.* **87**, 203 113 (2005).
- [4] O.G. Tovmachenko, C. Graf, D.J. Van den Heuvel, A. van Blaaderen, H.C. Gerritsen. *Adv. Mater.* **18**, 91 (2006).

- [5] J.B. Khurgin, G. Sun. *J. Opt. Soc. Am. B* **26**, B 83 (2009).
- [6] E. Dulkeith, A.C. Morteani, T. Niedereichholz, T.A. Klar, J. Feldmann, S.A. Levi, F.C.J.M. van Veggel, D.N. Reinhoudt, M. Moller, D.I. Gittins. *Phys. Rev. Lett.* **89**, 203 002 (2002).
- [7] H.-J. Park, D. Vak, Y.-Y. Noh, B. Lim, D.-Y. Kim. *Appl. Phys. Lett.* **90**, 161 107 (2007).
- [8] Z. Wang, Z. Chen, Z. Lan, X. Zhai, W. Du, Q. Gong. *Appl. Phys. Lett.* **90**, 151 119 (2007).
- [9] T.D. Neal, K. Okamoto, A. Scherer, M.S. Liu, A.K.-Y. Jen. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 221 106 (2006).
- [10] P.G. Nicholson, V. Ruiz, J.V. Macpherson, P.R. Unwin. *Chem. Commun.* **8**, 1052 (2005).
- [11] Ю.П. Пирятинский, О.В. Ярошук. *Опт. и спектр.* **89**, 942 (2000).
- [12] A.V. Glushchenko, G.A. Puchkovskaya, O.V. Yaroshchuk, Yu. Reznikov, A.A. Yaskubov. *J. Mol. Struct.* **381**, 133 (1996).
- [13] F. Li, O. Buchnev, C.I. Cheon, A. Glushchenko, V. Reshetnyak, Yu. Resnikov, T.J. Sluckin, J.L. West. *Phys. Rev. Lett.* **97**, 147 801 (2006).
- [14] T. Ikeda, S. Kurihara, S. Tazuke. *J. Phys. Chem.* **94**, 6550 (1990).
- [15] J.I. Kukielski. *J. Mol. Struct.* **478**, 1 (1999).
- [16] C. David, D. Baeyens-Volant. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **59**, 18 (1980).
- [17] Ю.П. Пирятинский, О.В. Ярошук. *Опт. и спектр.* **92**, 569 (2002).
- [18] В.Ф. Петров, М.Ф. Гребенкин, Б.Л. Островский. *Кристаллография* **33**, 1194 (1988).
- [19] T. Kobayashi. *J-Aggregates*. World Sci. Singapore (1996). 240 p.
- [20] T. Ikeda, S. Kurihara, S. Tazuke. *Liq. Cryst.* **7**, 749 (1990).