

УДК 547.6721+539.216

©1993

ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СЛОИ АНТРАЦЕНА

I. СТРУКТУРА И СПЕКТР ЭЛЕКТРОННО-ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ

Г. А. Сандул, М. Т. Шпак

Методами низкотемпературной флуоресценции изучен спектр электронно-возбужденных состояний в поликристаллических слоях антрацена, определяемый структурными особенностями данной системы. Он представлен состояниями, соответствующими когерентным и локализованным экситонам, краевым небазисным дислокациям и эксимерам. Обсуждается роль каждого из вышеназванных состояний в формировании температурной зависимости квантового выхода флуоресценции слоев в интервале температур 4.2–200 К. Показана доминирующая роль эксимерных состояний в процессе $S - T$ конверсии.

Ранее в работах [1–3] было показано, что при циклическом отжиге монокристаллов антрацена, как совершенных, так и содержащих краевые небазисные дислокации с вектором Бюргера в направлении [010] (b -ось кристалла), при определенных условиях отжига параллельно протекают два процесса: генерация названных выше дислокаций и их гибель. Таким образом, наблюдаемая в эксперименте концентрация дислокаций представляет собой компромисс этих двух противоположных событий, определяемый соотношением их констант скоростей [2].

В этой связи актуальность приобретает вопрос о поведении планарных поликристаллических систем (поликристаллические слои антрацена, нанесенные каким-либо способом на подложку) при их отжиге. Логичность такой постановки вопроса очевидна, тем более что монокристаллы антрацена, которые с точки зрения их структуры принято считать совершенными, в действительности, имея площадь $\gtrsim 10$ мм², обладают развитой блочной структурой. Таким образом, поликристаллические слои антрацена можно рассматривать как предельный случай таких блочных кристаллов.

Однако очевидно, что рассмотрению вопроса о поведении дислокаций в поликристаллических системах при их отжиге должно предшествовать изучение структурной организации таких слоев, ее изменений при отжиге и соответствующего спектра электронно-возбужденных состояний. Этому и посвящена настоящая работа.

1. Получение слоев антрацена и условия проведения эксперимента

Поликристаллические слои антрацена получали следующими способами: 1) термическое испарение антрацена в вакууме; 2) полив насыщенного раствора антрацена в n -парафинах (гексан) или бензоле на подложку

и последующее испарение растворителя; 3) расплав порошка антрацена в специальной кювете с зазором, определяющим толщину образца.

Представленные в настоящей работе исследования относятся в основном к слоям, полученным первым способом, поскольку он наиболее технологичный и позволяет получать слои, обеспечивая практически 100%-ную воспроизводимость результатов при рентгеноструктурных исследованиях и изучении их оптических свойств (электронные и колебательные спектры поглощения, люминесценция). При этом следует отметить, что слои, полученные вторым и третьим способом, обладают качественно теми же свойствами, что и слои, полученные термическим испарением в вакууме. Однако эти способы нетехнологичны, так как сложно контролировать технологические параметры (малоуправляемых параметров) получения слоев, а отсюда и меньшая воспроизводимость подобных структур слоев и их свойств.

Схема устройства камеры-колпака для напыления слоев органических соединений подробно описана в [4].

Для изготовления образцов использовали антрацен, очищенный методом зонной плавки (не менее 100 зонных проходов).

При напылении слоев строго контролировались и варьировались следующие параметры: 1) навеска шихты антрацена; 2) температура испарителя (определяет степень насыщенности паров); 3) скорость испарения вещества; 4) температура подложки (77–300 К); 5) материал подложки (кварц, стекло, металлы, полимерные материалы, сколы и прочие поверхности различных кристаллов); 6) время отогрева слоев, напыленных при низких температурах, до комнатной температуры.

Монокристаллы антрацена выращивали методом сублимации.

Поскольку низкотемпературная флуоресценция является чувствительным инструментом при изучении различных изменений в структуре и химическом составе молекулярных систем, то именно она была выбрана в качестве индикатора тех структурных, фотохимических и других изменений, которые происходят в слоях антрацена как при различных условиях их получения, так и при изучении различных воздействий на них (облучение, отжиг и т.д.).

Спектры флуоресценции регистрировали при различных температурах с использованием криостата с регулировкой и стабилизацией температуры в интервале 4.2–300 К на спектрометре ДФС-12. Возбуждение флуоресценции проводили лампой ДРШ-250 с фильтром для выделения спектральной линии 0.365 мкм. При этом диафрагмой 2.5–4 мм выделялся центральный участок слоя, нанесенного на подложку диаметром 16 мм и покрывающего ее по площади, ограниченной окружностью диаметром 14 мм.

Относительный квантовый выход флуоресценции измеряли по площадям под спектральной кривой флуоресценции.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

1) Электронно-микроскопические, электронографические и рентгеноструктурные исследования, выполненные на слоях антрацена и других линейных полициклических углеводородах [5–10], показали, что при всех условиях напыления слои имеют поликристаллическую структуру. При этом кристаллиты ориентированы таким образом, что их *ab*-плоскости

расположены параллельно плоскости подложки [5,9]. Размеры кристаллитов (средний диаметр), равно как и степень кристаллическости слоев (определяется из данных рентгеноструктурного анализа как отношение интенсивности рассеяния от кристаллической фазы к сумме интенсивностей рассеяния от кристаллической и аморфной фаз [11], сильно зависят от условий их получения.

Согласно классическим представлениям [12-16], процесс роста кристаллов, являясь фактически процессом неравновесным, представляет собой компромисс между потенциалами, определяющими взаимодействие в свою очередь между атомами и молекулами, что обуславливает определенную кристаллическую симметрию, и внешними условиями роста. Из внешних факторов, наиболее значительно влияющих на образование зародышей кристаллитов и процесс их роста, следует выделить плотность потока паров вещества (степень насыщенности паров) и поверхностную подвижность молекул [10,14].

Высокая насыщенность паров обуславливает рост кристаллов очень малых размеров, некоторое понижение насыщенности паров — рост кристаллов с огранкой (при увеличении времени роста образуются блочные ограненные кристаллы), недосыщенность паров — рост больших удлиненных кристаллов с округленной формой (колебания плотности насыщающих паров приводят к образованию форм испарения и роста, образованию ступеней испарения на ребре кристалла), длительный рост кристаллов в условиях значительной недосыщенности паров — рост кристаллов причудливых форм (комбинация скелетных форм растворения). В последнем случае основную роль в качестве источника роста кристаллитов играют дислокации (при условии, что их плотность велика). Кристалл при этом приобретает форму, определяемую особенностями распределения дефектов в кристалле [17].

Все вышесказанное относится, в частности, и к молекулярным кристаллам [18,19] и к образованию кристаллитов в поликристаллических слоях антрацена.

В процессе напыления слоев реализуется ситуация, когда степень насыщенности паров антрацена у поверхности слоя (по мере уменьшения вещества в испарителе) уменьшается. Следовательно, размеры кристаллитов и их форма по толщине пленки должны быть различны. Кроме того, при низких температурах подложки (ниже 140-120 К) значительно уменьшается поверхностная подвижность молекул и процессы, способствующие росту кристаллитов (встраивание молекул), значительно преобладают над процессами их деструкции (испарением молекул). Это явление также способствует быстрому множественному образованию кристаллитов. Считают [20], что основная стадия появления дефектов роста отвечает тому состоянию, когда отдельные кристаллиты приходят в соприкосновение друг с другом, объединяясь в сплошную пленку. Таким образом, при формировании напыленного слоя у подложки образуются кристаллиты очень малых размеров, обладающие значительными нарушениями структуры внутри самого кристаллита [8]. Такую структуру предложено определить как квазиаморфную, охарактеризовав ее как "смягченную" кристаллическую структуру со статистическим распределением молекулярных ориентаций и расстояний [21].

Необходимо также отметить, что процесс формирования слоя может существенно зависеть от потенциального рельефа подложки и разности

коэффициентов термического расширения слоя антрацена и материала подложки в том случае, если напыление ведется на охлажденную подложку с последующим отогревом ее до комнатной температуры. Последнее, как известно для монокристаллов антрацена [22], может приводить к образованию различных дислокаций.

При отогреве слоев до комнатной температуры, когда улучшаются условия кристаллизации, структура из квазиаморфной переходит в более упорядоченную — поликристаллическую [8]. Этот процесс сопровождается ростом дислокаций. Кристаллиты в таких слоях ориентированы своими ab -плоскостями параллельно поверхности подложки, b -оси кристаллитов в этой плоскости ориентированы хаотично [5].

2) На рис. 1 представлены типичные спектры флуоресценции слоев антрацена толщиной ≈ 1 мкм, напыленных на кварцевую подложку при различных условиях напыления, отогретых до комнатной температуры в течение 1 ч и измеренных при 77 К, в сравнении со спектром монокристалла $d \approx 1$ мкм, температура измерения $T = 77$ К.

Из рис. 1 видно, что в коротковолновой области спектра имеются полосы, характерные для монокристалла антрацена; структура же длинноволновой области спектра “замыта” накладывающейся широкой бесструктурной полосой с максимумом в области $21\ 000\ \text{см}^{-1}$, соответствующей эксимерной флуоресценции [9,23]. При этом следует отметить, что роль эксимерной “засветки” спектра флуоресценции мономера сказывается в большей степени при регистрации спектра со стороны подложки, чем со стороны свободной поверхности слоя. Следовательно, в слое, непосредственно контактирующем с подложкой, число молекул антрацена, расположенных в компланарных (близких к этому) плоскостях, наибольшее.

С увеличением толщины слоя отличия в спектрах флуоресценции, измеренных со стороны подложки и со стороны свободной поверхности, становятся более заметными. В то время как спектр флуоресценции слоя, измеренный со стороны подложки, с увеличением толщины слоя практически не изменяется, спектр флуоресценции, измеренный со стороны свободной поверхности, становится более структурным, приближаясь по виду к спектру флуоресценции монокристалла.

Этот результат коррелирует с ростом размеров кристаллитов (средний диаметр) на свободной поверхности слоя и, по-видимому, является следствием этого. Для слоя толщиной ≈ 1 мкм размер кристаллита на свободной поверхности составляет $\sim 0.8 \div 1.0$ мкм, а на поверхности, контактирующей с подложкой, $\lesssim 0.5$ мкм. С увеличением толщины слоя размер кристаллита на поверхности, контактирующей с подложкой, практически не меняется, а на свободной поверхности растет: для слоев толщиной ~ 10 и 30 мкм он составляет примерно $2-3$ и $4-5$ мкм соответственно. Слои толщиной ~ 50 мкм и более обычно трескаются и, отслаиваясь от подложки, осыпаются; слои толщиной более 10 мкм сильно рассеивают свет, поверхность их становится матовой.

Комментируя рис. 1, можно сделать следующий вывод. При испарении антрацена в условиях высокого вакуума ($\sim 10^{-6}$ Торр) на охлажденные до 77 К подложки он сублимирует без изменения химического состава [4], при этом образуются сплошные однородные по толщине пленки вплоть до толщин ~ 50 мкм. Низкий вакуум ($\sim 10^{-3}$ Торр) и неохлажденные подложки при напылении способствуют образованию несовершен-

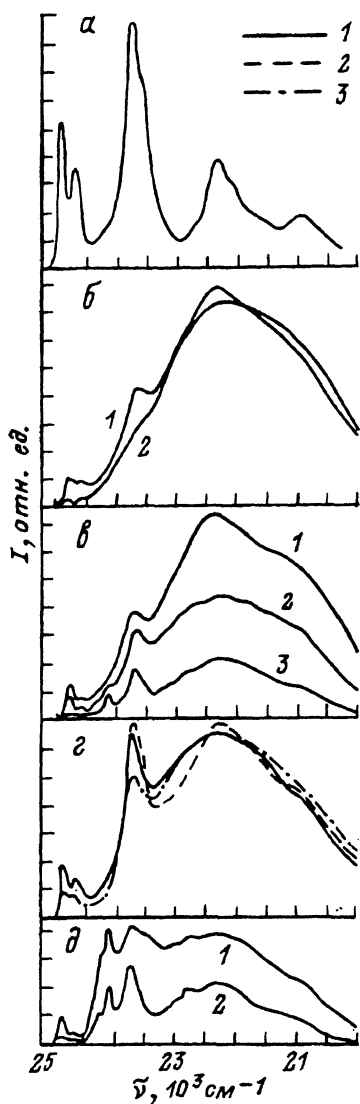


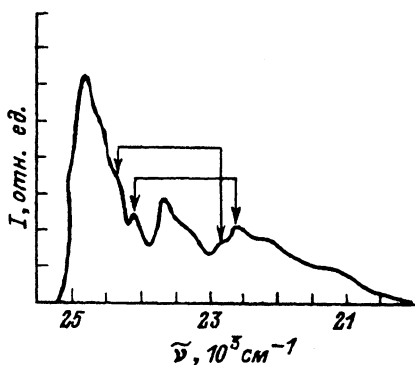
Рис. 1. Спектры флуоресценции монокристалла, поликристаллических слоев антрацена в зависимости от условий их получения (а).

б — вакуум $\sim 10^{-6}$ Торр, $T_{\text{подл}} = 77$ К, время испарения вещества ≈ 1 мин, спектр со стороны свободной поверхности слоя (1) и со стороны подложки (2); в — вакуум $\sim 10^{-2}$ Торр, $T_{\text{подл}} = 77$ К, спектр со стороны свободной поверхности, время испарения ≈ 1 (1), ≈ 10 (2), ≈ 20 мин (3); (z) — вакуум $\sim 10^{-6}$ Торр, $T_{\text{подл}} = 300$ К, спектр со стороны свободной поверхности, время испарения ≈ 1 (1), 20 мин (2), спектр со стороны подложки, время испарения 1 мин (3); (д) — вакуум $\sim 10^{-2}$ Торр, $T_{\text{подл}} = 300$ К, спектр со стороны свободной поверхности, время испарения ≈ 1 (1), 10 мин (2).

ных слоев: дыры, неоднородные по толщине участки и т.д. Напыление в низком вакууме, кроме того, приводит к изменению химического состава антрацена в процессе его термического испарения ($T_{\text{исп}} = 150 \div 200^\circ$): возникают такие примеси, как антрахинон, что в свою очередь приводит к падению квантового выхода флуоресценции и т.д.

Для полноты изложения необходимо также отметить, что спектры флуоресценции некоторых монокристаллов и поликристаллических слоев, полученных в условиях низкого вакуума (рис. 1, 2), содержат две серии полос с основными интервалами прогрессии, соответствующими частоте, близкой к 1400 см^{-1} , и начинающимися полосами 24350 и 24160 см^{-1} соответственно. Рис. 2 иллюстрирует наличие названных выше серий полос, которые часто наблюдаются и на монокристаллах антрацена [24–26], однако единого мнения о природе соответствующих им центров нет.

Рис. 2. Спектр флуоресценции слоя антрацена ($d \approx 10$ мкм) при 4.2 К и условиях напыления: вакуум $\sim 10^{-2}$ Торр, $T_{\text{подл}} = 77$ К, время испарения ≈ 20 мин.



По данным работы [24], эти полосы соответствуют свечению молекул антрацена, у которых π -электронное облако деформировано молекулами фотооксида антрацена, образовавшегося при облучении паров антрацена УФ-светом во время выращивания кристаллов методом сублимации в атмосфере кислорода. В работе [25] предполагают, что данные полосы являются электронно-колебательными полосами собственной флуоресценции антрацена, а именно полосам $24\ 350$ и $24\ 160\ \text{см}^{-1}$ отвечают внутримолекулярные колебания с частотами 750 и $940\ \text{см}^{-1}$ соответственно. Согласно [26], эти серии полос связаны с переходами в примесные центры — антролы. Данные работы [27] позволяют также предположить, что вышеназванные серии полос можно соотнести с двумя возможными неэквивалентными ориентациями одних и тех же монопроизводных молекул примеси (примесь замещения) в кристаллической решетке. Вопрос остается открытым.

3) При изучении поликристаллических слоев, в том числе и антрацена, одним из наиболее важных является вопрос о применимости экситонных представлений к таким системам.

Если размер кристаллита более или такого же порядка, как и область возбуждения в кристалле (линейные размеры области возбуждения порядка длины волны излучения, падающего на кристалл), а она в свою очередь значительно превышает постоянную решетки, то поглощение света в таких поликристаллических системах, так же как и в монокристаллах [28], сопровождается возникновением экситонных возбуждений. Однако поглощение поляризованного света даже отожженными слоями в силу их поликристаллической структуры не приводит к резкой поляризации полюса поглощения, как это имеет место у монокристаллов.

Поскольку размер кристаллитов в исследуемых нами поликристаллических слоях антрацена практически всегда порядка или более 0.5 мкм, то на вопрос о применимости экситонных представлений к таким слоям следует ответить положительно.

Кроме того, наличие давидовского расщепления в упорядоченных отожженных слоях линейных полициклических ароматических углеводородов [5-7,29,30], различное поведение компонент давидовского дублета при изменении межмолекулярного взаимодействия [7,31] и, наконец, совпадение по положению полос и их интенсивностей спектров поглощения и флуоресценции монокристаллов соответствующих аленов свидетельствуют о том, что в изучаемых нами упорядоченных поликристаллических

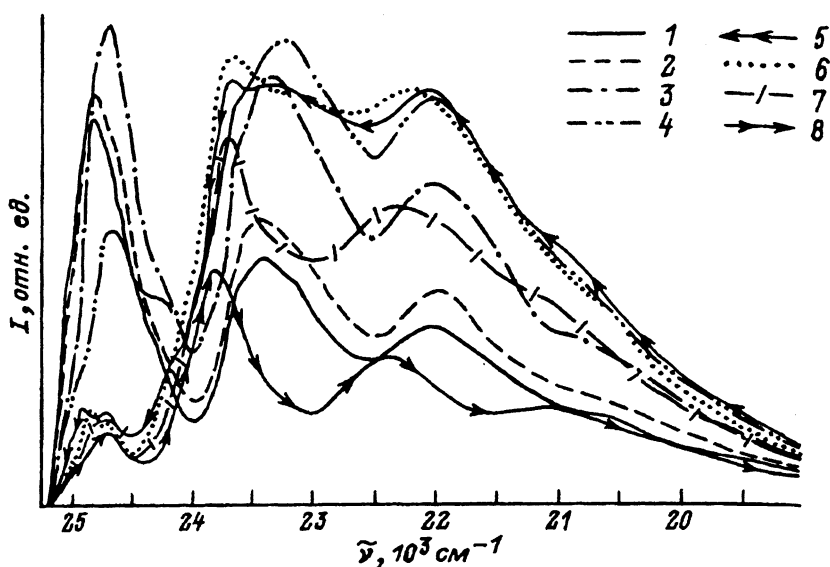


Рис. 3. Спектры флуоресценции поликристаллических слоев антрацена при $T = 4.2$ (1), 8.5 (2), 20 (3), 38 (4), 64 (5), 89 (6), 141 (7), 159 К (8).

ских слоях антрацена при поглощении света возникают экситонные состояния.

Для выяснения природы экситонов, образующихся в поликристаллических структурах при поглощении света, была изучена температурная зависимость флуоресценции слоев в интервале температур 4.2–200 К (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что при температуре 4.2 К полоса чисто электронного перехода, отвечающая когерентным экситонам в спектре флуоресценции монокристаллов антрацена ($\sim 25\,100\text{ см}^{-1}$), в слоях выражена слабо; доминирующей в спектре является полоса с максимумом в области $24\,812\text{ см}^{-1}$, которая, согласно [22], отождествляется с 0–0 полосой спектра, соответствующего небазисным краевым дислокациям с вектором Бюргера в направлении [010] (**b**-ось кристалла). Однако эта полоса в пленках более уширена, чем в монокристаллах; как и в монокристалле [1,32], угадывается структура, по-видимому, соответствующая различным краевым дислокациям, линии которых лежат в разных плоскостях скольжения и выходят на поверхность (001), но имеющих одно и то же направление вектора Бюргера, либо небазисным краевым дислокациям, имеющим различное направление вектора Бюргера.

В отличие от монокристалла, где дислокационная полоса наблюдается лишь при 4.2 К, в поликристаллических слоях она наблюдается уже при более высоких температурах.

Из рис. 3 также следует немонотонный характер температурной зависимости интенсивности дислокационной полосы (см. также рис. 4, 2). Это явление можно объяснить, сделав предположение о сильной экситоно-фононной связи, наличием более мелкого уровня захвата экситонов. По оценкам, проведенным из данных температурной зависимости интенсивности дислокационной полосы, энергия активации предполагаемого уровня $\approx 40\text{ см}^{-1}$. Энергетические состояния в молекулярных кристаллах, расположенные ниже дна экситонной зоны на величину энергии

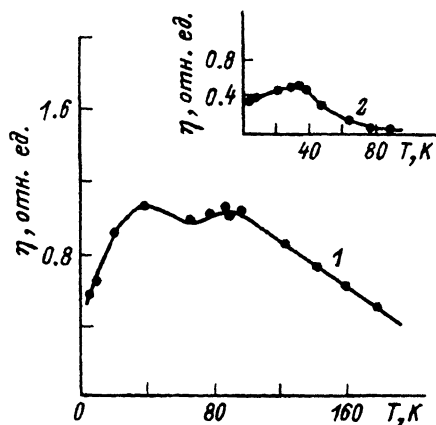


Рис. 4. Температурная зависимость относительного квантового выхода флуоресценции поликристаллических слоев антрацена со стороны подложки (1), дислокационной полосы (2).

вплоть до 200 см^{-1} , изучались довольно подробно и были определены как состояния, соответствующие локализованным экситонам [33,34]. В связи с изложенным выше, энергетические состояния в области $25\,060 \text{ см}^{-1}$ с большой степенью достоверности также можно отнести к локализованным экситонным состояниям, хотя причинно-следственная связь возникновения такой локализации не ясна. При этом необходимо отметить, что у монокристаллов при наличии дислокаций немонотонной температурной зависимости квантового выхода флуоресценции, обусловленной дислокациями, не наблюдается.

Сложность энергетического спектра возбужденных состояний такой поликристаллической системы находит свое отражение и в температурной зависимости относительного квантового выхода флуоресценции (рис. 4). Из этого рисунка следует, что при измерении со стороны подложки (1), где наличие структурных особенностей пленки, обуславливающих эксимерные состояния, существенно больше, чем со стороны свободной поверхности, относительный квантовый выход флуоресценции имеет два максимума и резко убывает в области низких (4.2–20 K) и высоких (начиная с 90 K) температур. При этом известно, что квантовый выход флуоресценции совершенных монокристаллов антрацена в этом интервале температур не зависит от температуры [35].

Максимум в области 38 K обусловлен температурной зависимостью квантового выхода флуоресценции, соответствующей дислокациям; максимум в области 80 K обусловлен температурной зависимостью флуоресценции эксимеров [36].

Общее уменьшение квантового выхода флуоресценции поликристаллических структур при увеличении температуры можно объяснить, сделав предположение об увеличении вероятности безызлучательной дезактивации рассмотренных выше возбужденных состояний. Одним из наиболее вероятных каналов такой дезактивации являются переходы в триплетное состояние. В монокристаллах антрацена $S-T$ переход запрещен по спину и вероятность $S'-T'$ конверсии мала. В поликристаллической системе наличие уровней, соответствующих локализованным экситонным состояниям, дислокациям и эксимерам, по-видимому, ослабляет условие запрета и $S'-T'$ конверсия становится более вероятной. Если дезактивация возбужденных состояний идет через триплетное состояние, то тушение флуоресценции под действием УФ облучения за счет процесса

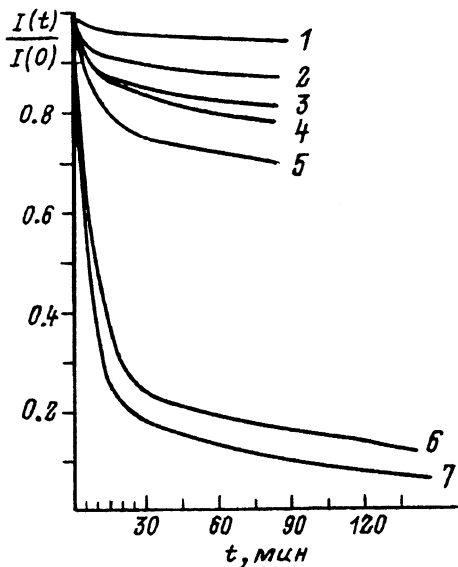


Рис. 5. Тушение флуоресценции под действием УФ-облучения ($\lambda_{обл} = 0.365$ мкм, облученность $3.5 \cdot 10^{17}$ фотон·см⁻²·с⁻¹) на воздухе при комнатной температуре монокристалла, выращенного методом сублимации (1), из раствора в бензоле (2), из расплава в кювете (3), из расплава методом Бриджмена (4), монокристалла антрацена с примесью нафтацена (1:300 в.ч.) (5), поликристаллического слоя отожженного (6), поликристаллического слоя без отжига (7).

фотоокисления молекул антрацена с образованием молекул антрахинона [37] в поликристаллической системе должно существенно превышать тушение флуоресценции в монокристаллах антрацена. При этом тушение флуоресценции монокристаллов должно увеличиваться по мере уменьшения степени совершенства их кристаллической структуры. Рис. 5 иллюстрирует эти явления.

Из рис. 5 следует, что тушение флуоресценции в поликристаллических слоях значительно превосходит тушение флуоресценции в монокристаллах. Например, тушение флуоресценции монокристаллов, даже самых несовершенных, при облучении их в течение 1 ч достигает 20%, в то время как у слоев за то же время облучения при тех же условиях оно достигает 90% и более. По-видимому, столь сильное тушение флуоресценции поликристаллической структуры по сравнению с монокристаллической обусловлено именно особенностью ее структуры и энергетики. Поскольку тушение флуоресценции у монокристаллов при возникновении в них локализованных экситонных состояний и наличии дислокаций не превышает 15–20%, можно сделать вывод о доминирующей роли эксимерных состояний, реализуемых поликристаллической системой, в процессе $S^1 - T^1$ конверсии и соответственно тушении флуоресценции.

Таким образом, система возможных энергетических состояний электронных возбуждений в беспримесных планарных поликристаллических структурах антрацена состоит из уровней, соответствующих когерентным и локализованным экситонам, небазисным краевым дислокациям и эксимерам.

Список литературы

- [1] Лисовенко В.А., Сандул Г.А., Шпак М.Т. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 8. С. 2465–2469.
- [2] Сандул Г.А., Шпак М.Т. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 3. С. 807–811.
- [3] Сандул Г.А., Шпак М.Т. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 12. С. 3585–3590.
- [4] Курик М.В., Сандул Г.А. // УФЖ. 1970. Т. 15. № 3. С. 392–395.
- [5] Hofberger W. // Phys. Stat. Sol. 1975 (a). V. 30. N 1. P. 271–278.

- [6] Sakurai T., Hayakawa S. // Jap. J. Appl. Phys. 1974. V. 13. N 11. P. 1733-1740.
- [7] Kamura Y., Shirotahi J., Jnokuchi Y., Maruyama Y. // Chem. Lett. 1974. N 10. P. 627-630.
- [8] Bönsch G., Kleinert G., Flammersfeld A. // Z. Physik. 1969. V. 222. N 4. P. 363-371.
- [9] Cheorghita-Oancea C. // Rev. de Phys. 1963. T. 8. N 4. P. 361-375.
- [10] Riemer W., Hardy J.V. // Phys. Stat. Sol. 1972 (a). V. 14. N 2. P. 473-482.
- [11] Тарер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Химия, 1968. С. 113-114.
- [12] Gibbs J.W. // Trans. Conn. Acad. Arts. Sci. 1978. V. 3. P. 343.
- [13] Михеев В.И., Шафрановский И.И. // Записки Всесоюзного минералог. общества. 1948. Ч. 77. В. 4.
- [14] Шафрановский И.И. Кристаллы минералов. Кривогранные, скелетные и зернистые формы. М.: Гостехиздат, 1961.
- [15] Шафрановский И.И. Лекции по кристалломорфологии. М.: Высшая школа, 1968.
- [16] Хирс Д., Паунд Г. Испарение и конденсация. М.: Металлургия, 1966.
- [17] Dash W.C. // J. Appl. Phys. 1956. V. 27. N 10. P. 1193-1195.
- [18] Китайгородский А.И. Молекулярные кристаллы. М.: Наука, 1971.
- [19] Гинет Г.А. // Автореф. канд. дис. Киев, 1975. С. 19.
- [20] Pashley D.W. // Adv. Phys. 1965. V. 14. N 55. P. 327-416.
- [21] Müller H., Basler H., Vaubel G. // Chem. Phys. Lett. 1974. V. 29. N 1. P. 102-105.
- [22] Lisovenko V.A., Shpak M.T., Salo V.L. // Phys. Sol. (a). 1975. V. 29. N 2. P. 101-103.
- [23] Perkampus H.-H., Pohl L. // Z. Phys. Chem. Neue Folge. 1963. V. 39. N 5/6. P. 397-401.
- [24] Зима А.Л., Файдыш А.Н. // Опт. и спектр. 1963. Т. 14. № 3. С. 371-377.
- [25] Lacey A.R., Lyons L.A. // J. Chem. Soc. 1964. N 12. P. 5393-5400.
- [26] Лисовенко В.А., Шпак М.Т. // УФЖ. 1966. Т. 11. № 4. С. 404-410.
- [27] Курмей Н.Д. Шпак М.Т. // УФЖ. 1989. Т. 34. № 3. С. 375-381.
- [28] Давыдов А.С. Теория молекулярных экситонов. М.: Наука, 1968. С. 28-112.
- [29] Jetter H.L., Wolf H.C. // Phys. Stat. Sol. 1967. V. 22. N 1. P. K39-K43.
- [30] Perkampus H.-H., Pol L. // Theoret. Chim. Acta (Berlin). 1963. V. 1. N 2. P. 116-123.
- [31] Shirotani J., Kamura Y., Jnokuchi H. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1974. V. 28. N 3-4. P. 345-352.
- [32] Кондратенко П.А., Лисовенко В.А., Хуторная Л.А., Шпак М.Т. // УФЖ. 1980. Т. 25. № 11. С. 1775-1780.
- [33] Сугаков В.И. // Опт. и спектр. 1966. Т. 21. № 5. С. 574-582.
- [34] Остапенко Н.И., Сугаков В.И., Шпак М.Т. // Сб. "Экситоны в молекулярных кристаллах". Киев: Наукова думка, 1973. С. 92-140.
- [35] Зима В.Л., Файдыш А.Н. // Опт. и спектр. 1965. Т. 19. № 3. С. 359-364.
- [36] Tanaka J. // Bull. Chem. Soc. Japan. 1963. V. 36. N 10. P. 1237-1249.
- [37] Кондратенко П.А., Курик М.В., Сандул Г.А. // Сб. "Способы записи информации на бессересбряных носителях". Киев: Вища школа, 1974. В. 5. С. 81-94.

Институт физики
АН Украины
Киев

Поступило в Редакцию
30 ноября 1992 г.