

## Влияние электрического поля на оптическое поглощение аморфных молекулярных полупроводников, допированных полиметиновыми красителями

© Н.А. Давиденко, Н.А. Деревянко\*, А.А. Ищенко\*, В.А. Павлов

Киевский университет им. Т. Шевченко,  
01033 Киев, Украина

\* Институт органической химии Национальной академии наук Украины,  
02094 Киев, Украина

(Поступила в Редакцию 18 октября 2000 г.)

Исследованы особенности изменения в постоянном электрическом поле спектров электронного поглощения пленок поли-*N*-эпоксипропилкарбазола, полистирола и поливинилбутираля, допированных полиметиновыми красителями. Обнаружены закономерности изменения этих спектров в области поглощения красителя в зависимости от величины дипольного момента и симметрии  $\pi$ -электронной структуры молекулы красителя. Сделан вывод о том, что во внешнем электрическом поле происходит перераспределение электронной плотности в молекуле красителя. Последнее является причиной появления наведенной электрическим полем анизотропии пространственной функции распределения фотогенерированных электронно-дырочных пар в аморфных молекулярных полупроводниках.

Аморфные молекулярные полупроводники (АМП) на основе фотопроводящих полимеров, допированных органическими веществами, обладают фотопроводящими свойствами в видимой и ближней ИК-областях света благодаря тому, что молекулы допантов являются не только центрами поглощения света, но и центрами фотогенерации носителей заряда. Наиболее изученными и до сих пор практически применяемыми являются АМП на основе поли-*N*-винилкарбазола, поли-*N*-эпоксипропилкарбазола (ПЭПК). Для этого типа полупроводников известно [1,2], что процесс фотопроводимости в области поглощения центров фотогенерации можно представить состоящим из двух стадий. На первой стадии после поглощения кванта света в молекуле центра фотогенерации из нее уходит положительный заряд (дырка) на карбазольное ядро полимера и образуется связанная электронно-дырочная пара (ЭДП). На второй стадии происходит либо аннигиляция ЭДП, либо ее диссоциация. Вероятность диссоциации ЭДП увеличивается с ростом напряженности внешнего электрического поля  $E$  и температуры  $T$ . Теоретическое описание диссоциации ЭДП в электрическом поле базируется на модели Онзагера [3] для вероятности разделения двух заряженных частиц в изотропной среде. Для больших  $E$  вероятность разделения ЭДП в модели Онзагера совпадает с аналогичной, но рассчитанной в одномерной модели Пула–Френкеля [2]. При этом для диапазона  $1 \cdot 10^7 < E < 1 \cdot 10^8$  В/м теоретическое описание процесса диссоциации ЭДП соответствует аналитическому выражению, полученному эмпирически из результатов измерений фототока  $j$  в образцах АМП. Поскольку величина  $j$  прямо пропорциональна квантовому выходу  $\eta$  фотогенерации носителей тока, считается, что

$$j \sim \eta \sim \eta_0 \exp(-(W_{\text{ph}} - \beta E^{1/2}))(T^{-1} - T_0^{-1})/k, \quad (1)$$

где  $\eta_0$  — квантовый выход образования ЭДП,  $W_{\text{ph}}$  — энергия активации фотогенерации, которая равна энер-

гии кулоновского притяжения между дыркой и электроном в фотогенерированной ЭДП,  $\beta$  — постоянная Пула–Френкеля,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_0$  — характеристическая температура, которая для пленок на основе ПЭПК составляет  $490 \pm 20$  К. Из выражения (1) следует, что с ростом  $E$  величины  $\eta$  и  $j$  увеличиваются, но для  $E > (W_{\text{ph}}/\beta)^2$  они не должны зависеть от  $E$ . Однако последнее при экспериментальной проверке наблюдается не всегда. Зачастую при увеличении  $E > (W_{\text{ph}}/\beta)^2$  до предпробойных значений напряженности электрического поля  $j$  возрастает. Для объяснения наблюдаемых отклонений экспериментальных зависимостей  $\eta(E)$  и  $j(E)$  от зависимости (1) в больших полях можно рассмотреть по крайней мере три причины.

Во-первых, ЭДП образуется из возбужденных состояний молекулы центра фотогенерации с разными временами жизни таких состояний. Внешнее электрическое поле способствует увеличению вероятности ионизации возбужденных молекул [4,5] посредством уменьшения потенциального барьера при выходе носителя заряда из центра фотогенерации на соседнюю молекулу. Такой механизм роста квантового выхода фотогенерации ЭДП во внешнем электрическом поле был ранее изучен для пленок АМП на основе ПЭПК, допированных соединениями с внутримолекулярным переносом заряда (СВПЗ) [6] и ионными красителями [7].

Во-вторых, в состав АМП входят органические молекулы с неоднородным распределением зарядов по структуре молекулы, которые создают электрические неоднородности в объеме АМП. Такие неоднородности могут быть причиной захвата неравновесных носителей. Внешнее электрическое поле уменьшает энергию связи носителей заряда с областями электрических неоднородностей, что проявляется в увеличении фотопроводимости с ростом  $E$ . Такой механизм влияния электрического поля на освобождение захваченных носителей был ранее

изучен в пленках ПЭПК с СВПЗ [8,9], с ионными [10] и внутриионными [11] красителями.

В-третьих, в соотношении (1) как множитель входит квантовый выход фотогенерации ЭДП  $\eta_0$ , который в моделях фотогенерации для изотропных АМП считается не зависящим от величины и направления внешнего электрического поля. Это означает, что направление выхода носителя заряда из возбужденного центра фотогенерации при образовании ЭДП не должно зависеть от внешних факторов и пространственное распределение фотогенерированных ЭДП по расстояниям между зарядами в ЭДП можно описать сферической функцией. Однако если молекула центра фотогенерации обладает большим дипольным моментом, то для нее должна быть высокая анизотропия вероятности внутримолекулярных и межмолекулярных электронных переходов. Во внешнем электрическом поле вероятность межмолекулярных электронных переходов из таких молекул должна зависеть от ориентации молекулы относительно направления поля. Если к тому же возможен поворот дипольного момента молекулы во внешнем электрическом поле, то с увеличением  $E$  пространственную функцию распределения ЭДП по расстояниям между зарядами нельзя уже считать сферической. При этом можно ожидать увеличения вероятности образования ЭДП, у которых дипольный момент направлен против направления силовых линий внешнего электрического поля, а такие ЭДП имеют самую большую вероятность диссоциации. Последнее должно приводить к увеличению  $\eta_0$  с ростом  $E$ . Обсуждаемый механизм влияния электрического поля на фотогенерацию ЭДП в АМП подобен эффекту Фредерикса, который хорошо изучен для жидких кристаллов [12,13]. Однако в литературе мало уделялось внимания его экспериментальной проверке и изучению для АМП.

Для экспериментального исследования особенностей влияния внешнего электрического поля на пространственное распределение фотогенерированных ЭДП в допированных АМП могут быть применены спектроскопические методы, а именно влияние электрического поля на фотоабсорбцию и фотолюминесценцию. Цель настоящей работы состояла в изучении влияния внешнего электрического поля на оптические спектры поглощения АМП, допированных органическими красителями с различными распределениями зарядов.

## 1. Образцы и методика эксперимента

Для достижения поставленной цели в качестве объектов исследований были выбраны АМП на основе ПЭПК, допированные полиметиновыми красителями. Эти красители могут быть эффективными центрами фотогенерации носителей заряда в ПЭПК [7] и благодаря особенностям структуры молекул позволяют целенаправленно варьировать распределение и величину зарядового состояния [14]. Последнее дало возможность выделить три группы красителей.

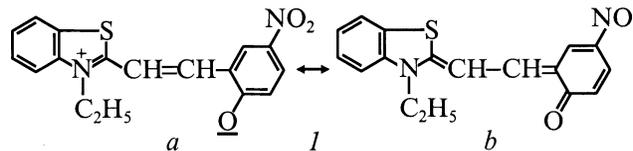


Рис. 1. Структурная формула мероцианина 1. *a* — основное состояние, *b* — возбужденное.

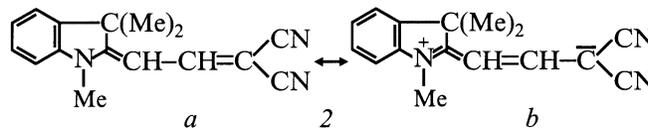


Рис. 2. Структурная формула мероцианина 2. *a* — основное состояние, *b* — возбужденное.

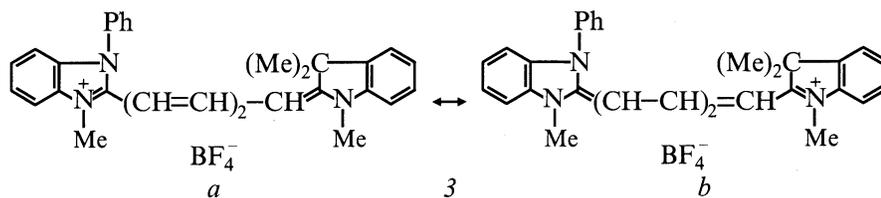
Первая группа — внутриионные красители с сильным разделением положительных и отрицательных зарядов на концах хромофора в основном состоянии [15]. Типичным примером такого красителя является мероцианин 1, структурная формула молекулы которого представлена на рис. 1. В основном состоянии у него преобладает биполярная структура. При поглощении кванта света избыточная электронная плотность с атома кислорода перемещается на положительно заряженный бензотиазольный гетероцикл. Поэтому возбужденное состояние мероцианина 1 приближается к нейтральной граничной структуре. Иными словами, при электронном возбуждении происходит резкое уменьшение дипольного момента молекулы.

Ко второй группе красителей относятся прежде всего внутриионные красители, у которых в отличие от соединения 1 основное состояние описывается нейтральной граничной структурой, а возбуждение — биполярной [15]. Примером такого красителя является мероцианин 2 (рис. 2).

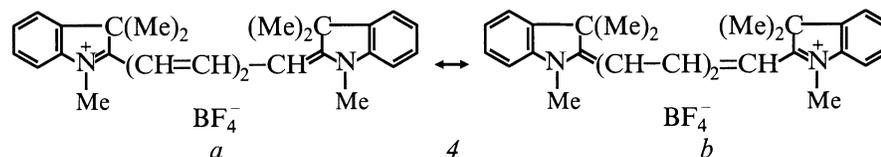
В отличие от мероцианина 1 его дипольный момент при поглощении света существенно увеличивается.

Ко второй группе относятся также несимметричные ионные красители, например краситель 3 (рис. 3).

Молекула красителя состоит из двух отдельных противоионов. Поглощение света происходит в хромофоре органического противоиона. В отличие от мероцианинов 1 и 2 хромофоры ионных красителей являются заряженными как в основном, так и в возбужденном состояниях (см. граничные структуры *a* и *b*). Суммарные заряды катионных (окрашенный катион) и анионных (окрашенный анион) красителей соответственно равны  $+1$  и  $-1$ . Эти заряды сохраняются как в основном, так и в возбужденном состояниях. Однако в случае несимметричных красителей распределение отдельных зарядов в ионе неравномерно. Например, у катионного несимметричного полиметинового красителя 3 в основном состоянии положительный заряд преимущественно локализован на более электронодонорном бензимидазольном гетероци-



**Рис. 3.** Структурная формула катионного несимметричного полиметинового красителя 3. *a* — основное состояние, *b* — возбужденное.

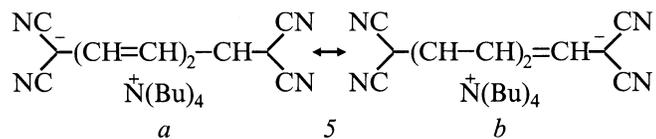


**Рис. 4.** Структурная формула катионного симметричного полиметинового красителя 4. *a* — основное состояние, *b* — возбужденное.

кле, как это видно из структурной формулы этого красителя. В возбужденном состоянии он, наоборот, в большей степени сосредоточен на индолиевом гетероцикле. Граничные структуры *a* и *b* несимметричного красителя 3 имеют подобную катионную форму, тогда как у мероцианинов 1 и 2 они резко отличаются: одна из них биполярная, а другая нейтральная. Поэтому у несимметричных красителей типа 3 изменение дипольного момента при возбуждении меньше, чем у мероцианинов.

Третья группа — симметричные ионные (катионные и анионные) красители. В отличие от несимметричных полиметиновых красителей они характеризуются симметричным распределением заряда между концевыми гетероциклами окрашенного хромофора. Это вызвано тем, что симметричные красители имеют одинаковые концевые группы, так, например, краситель 4 (рис. 4). Более строгие квантово-химические расчеты показывают, что, хотя симметрия в распределении заряда сохраняется в возбужденном состоянии, так же как и в основном, граничные структуры *a* и *b* красителей типа 4 неэквивалентны [14]. Отличие структур *a* и *b* вызвано изменением численных величин зарядов на отдельных атомах при возбуждении. Аналогичные тенденции в распределении заряда характерны и для симметричных анионных красителей типа 5 (рис. 5).

К третьей группе красителей относятся также симметричные скварилиевые красители. Они являются разновидностью внутриионных красителей, которые в отличие



**Рис. 5.** Структурная формула анионного симметричного полиметинового красителя 5. *a* — основное состояние, *b* — возбужденное.

от мероцианинов описываются биполярными граничными структурами в основном и возбужденном состояниях. Представителем этой группы красителей является сквариин 6 (рис. 6).

Образцы готовились в виде структур со свободной поверхностью: стеклянная подложка–электропроводящий слой  $\text{SnO}_2:\text{In}_2\text{O}_3$ –полимерная пленка. Использовались полимерные пленки ПЭПК, полистирола (ПС), поливинилбутирала (ПВБ), содержащие 1 mass.% красителя. Полимерные пленки получались высушиванием растворов полимера с красителем в 1,2-дихлорэтане, разлитых по поверхности стеклянных подложек со слоем  $\text{SnO}_2:\text{In}_2\text{O}_3$ . Толщины высушенных пленок составляли 1.5–2  $\mu\text{m}$ .

В приготовленных образцах с помощью спектрально-вычислительного комплекса КСВУ-23 измерялись коэффициент поглощения полимерных пленок и его изменение во внешнем электрическом поле. Для этого вначале при выбранной длине волны света  $\lambda$  определялся коэффициент поглощения  $\kappa_0$  полимерной пленки без приложения внешнего электрического поля. Затем полимерная пленка заряжалась в коронном разряде, регистрировалось изменение во времени коэффициента поглощения до его нового квазистационарного значения и определялся коэффициент поглощения  $\kappa_E$  во внешнем электрическом поле. Далее рассчитывалась величина изменения коэффициента поглощения  $\delta\kappa = \kappa_E - \kappa_0$  во внешнем электрическом поле. Полимерная пленка заряжалась в коронном разряде с помощью специального электронного устройства. Напряженность электрического поля  $E$  в пленке была в пределах  $(6-10) \cdot 10^7$  В/м; ее получали, исходя из величины потенциала свободной поверхности относительно потенциала электропроводящего слоя  $\text{SnO}_2:\text{In}_2\text{O}_3$ . Коэффициент поглощения и  $\delta\kappa$  определялись для волн света в диапазоне 400–1000 нм, в котором есть поглощение красителей и отсутствует поглощение ПЭПК, ПС, ПВБ. Измерения проводились

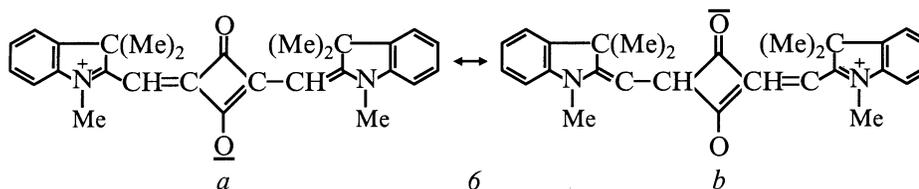


Рис. 6. Структурная формула симметричного скварилиевого красителя *b*. *a* — основное состояние, *b* — возбужденное.

как для неполяризованного света, так и для линейно поляризованного света с изменением угла поляризации. В последнем случае на пути светового луча, прошедшего от источника света через поляризатор и исследуемый образец, перед входной щелью монохроматора помещался еще один поляризатор с изменяемым направлением поляризации. Измерения проводились при температуре  $T = 293$  К.

## 2. Результаты исследований

Для всех исследованных образцов обнаружено влияние внешнего электрического поля на оптические спектры поглощения полимерных пленок ПЭПК, ПС и ПВБ с красителями (рис. 7–9). Это влияние проявляется после приложения электрического поля в появлении положительных и отрицательных максимумов зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  в диапазоне длин волн света, в котором находится максимум поглощения красителя. После выключения электрического поля спектр поглощения восстанавливается. Установлено, что при замене полимерной матрицы ПЭПК на ПС и ПВБ меняется значение  $\lambda$  для максимума поглощения красителя из-за изменения показателя преломления и диэлектрической проницаемости полимера [14], но порядок чередования положительных и отрицательных максимумов зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  при этом сохраняется. Не изменяется порядок чередования положительных и отрицательных максимумов зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$ , измеренных в образцах с полимерными пленками, содержащими красители из одной и той же выделенной нами выше группы. Абсолютные значения  $\delta\kappa$  увеличиваются с ростом напряженности внешнего электрического поля, но не зависят от поляризации падающего и прошедшего сквозь образец света. После приложения внешнего электрического поля в полимерных пленках с красителями из второй (красители 2, 3) и третьей (красители 4–6) групп величина коэффициента поглощения изменяется со скоростью зарядки поверхности пленки за время, не превышающее 0.2 с, а в пленках с красителями из первой группы (краситель 1) это изменение происходит более чем за 20 с.

Отличие полимерных пленок с красителями из первой группы (краситель 1) от пленок с красителями из второй (красители 2, 3) и третьей (красители 4–6) групп состоит и в том, что для них во всем диапазоне длин волн из длинноволнового максимума поглощения во внешнем электрическом поле наблюдается только уменьшение  $\kappa$ .

Например, представленные на рис. 7 зависимости  $\kappa(\lambda)$  и  $\delta\kappa(\lambda)$  для пленок ПЭПК с красителем 1 показывают, что положение отрицательного максимума зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  совпадает с максимумом зависимости  $\kappa(\lambda)$ .

Для полимерных пленок с красителями 2, 3 (вторая группа) при уменьшении длины волны света, начиная от длинноволнового края поглощения, вначале наблюдается

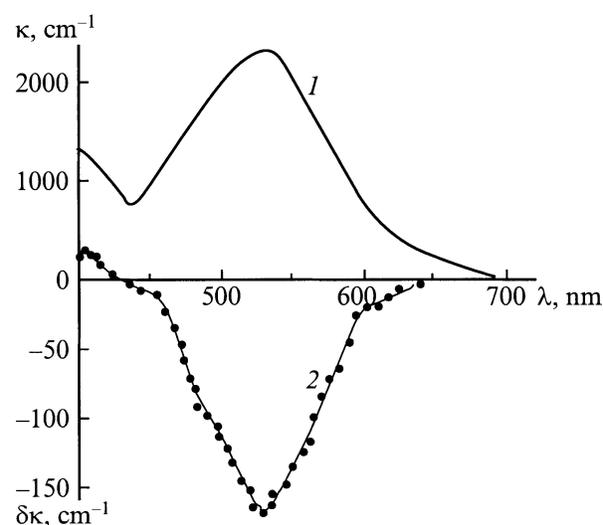


Рис. 7. Спектр коэффициента поглощения (1) и изменение коэффициента поглощения (2) в электрическом поле пленок ПЭПК с 1 mass.% красителя 1.  $E = 8 \cdot 10^7$  V/m.

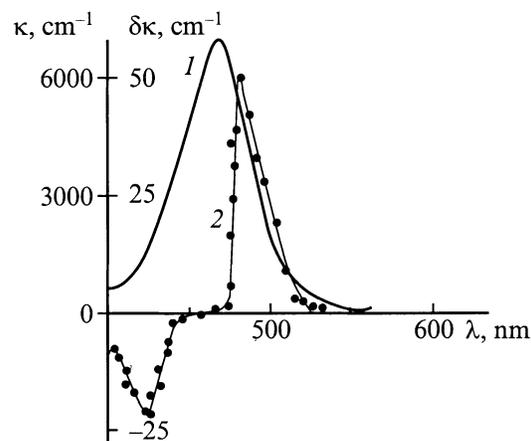
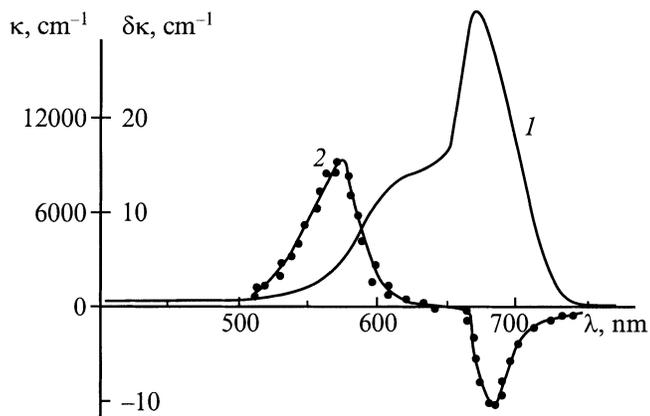


Рис. 8. Спектр коэффициента поглощения (1) и изменение коэффициента поглощения (2) в электрическом поле пленок ПЭПК с 1 mass.% красителя 2.  $E = 8 \cdot 10^7$  V/m.



**Рис. 9.** Спектр коэффициента поглощения (1) и изменение коэффициента поглощения (2) в электрическом поле пленок ПЭПК с 1 mass.% красителя 4.  $E = 8 \cdot 10^7$  V/m.

положительный максимум зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$ , который затем переходит в отрицательный. Такое чередование максимумов зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  для пленок ПЭПК с красителем из второй группы представлено на рис. 8. Отметим, что изменение знака обсуждаемой зависимости наблюдается вблизи длин волн света, соответствующих максимуму поглощения красителя, а разница длин волн света, для которых наблюдаются положительный и отрицательный максимумы зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$ , составляет около 40 nm ( $\sim 0.35$  eV).

Третья группа (красители 4–6) отличается тем, что при уменьшении длины волны света, начиная от длинноволнового края поглощения, вначале наблюдается отрицательный максимум зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$ , который затем переходит в положительный (рис. 9). Здесь также отметим, что изменение знака зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  наблюдается вблизи длин волн света, соответствующих максимуму поглощения красителя, а разница длин волн света, для которых наблюдаются отрицательный и положительный максимумы зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$ , составляет около 110 nm ( $\sim 0.49$  eV).

### 3. Обсуждение результатов

Для всех групп красителей спектры поглощения полностью восстанавливаются при выключении электрического поля. При каждом его включении картина закономерно повторяется. Следовательно, описанные спектральные эффекты не связаны с разложением красителей. Допустимо предположить, что наблюдаемое изменение спектров поглощения полимерных пленок с красителем во внешнем электрическом поле обусловлено несколькими возможными причинами.

Уменьшение коэффициента поглощения полимерных пленок с ростом напряженности электрического поля может быть обусловлено возрастанием концентрации носителей заряда в результате фотогенерации ЭДП и их разделения в электрическом поле посредством переходов

между молекулами. При этом должно изменяться зарядовое состояние молекул красителя, уменьшаться поглощение в полосе поглощения красителя и появляться поглощение в полосах поглощения радикалов красителя и молекул, по которым происходит перенос носителей заряда. Однако влияние электрического поля на спектры поглощения красителей наблюдается не только в полимерных пленках ПЭПК, где есть фотогенерация и транспорт носителей заряда, но и в пленках ПС и ПВБ, где фотопроводимость не наблюдается. Кроме того, в пленках ПЭПК с разными красителями положительные максимумы зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  наблюдаются при различных значениях длин волн света, а следовательно их нельзя отождествить с максимумами поглощения катион-радикала карбазола, образующимися в процессе фотогенерации и транспорта дырок.

Вторая из возможных причин изменения спектров поглощения — расщепление энергий электронных переходов в электрическом поле (эффект Штарка). Однако в исследованных образцах с красителями из первой группы в полосе поглощения красителя наблюдается только отрицательный максимум зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  и не обнаружены положительные максимумы, что было бы характерным при наблюдении эффекта Штарка [16]. В образцах с красителями из второй и третьей групп положение отрицательного максимума зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  не совпадает с положением максимума зависимости  $\kappa(\lambda)$ , а положительные и отрицательные максимумы зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  (кривые 2 на рис. 8 и 9) разделены значительным энергетическим расстоянием, большим, чем это можно ожидать для эффекта Штарка при используемых нами напряженностях электрического поля [16]. Кроме того, не наблюдается зависимости спектров поглощения от поляризации падающего света. Из этого следует, что если обсуждаемые эффекты и связаны с поляризуемостью молекул красителей в электрическом поле, то они требуют более детального изучения.

Мы предполагаем, что изменение спектров поглощения полимерных пленок с красителями в электрическом поле обусловлено в основном эффектами поляризации электронных оболочек молекул красителей. Однако если их молекулы имеют большой дипольный момент, то эти эффекты могут быть связаны также с изменением ориентации молекул красителей.

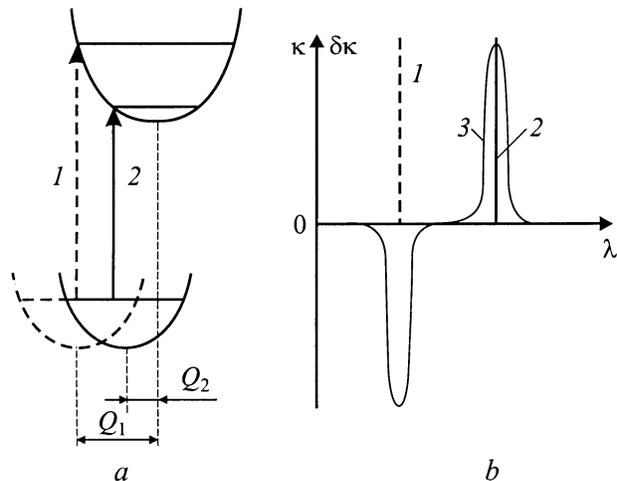
Красители первой группы в основном состоянии обладают сильно выраженной биполярной структурой и наиболее подвержены влиянию внешнего электрического поля. Механизм этого влияния можно рассматривать как усиление различий граничных структур основного и возбужденного состояний, что сопровождается уширением полосы поглощения и падением ее интенсивности [14]. Кроме того, эти красители более подвержены эффектам переориентации молекул в электрическом поле. Поэтому для них характерно уменьшение коэффициента поглощения во всей спектральной области длинноволнового максимума поглощения. Отметим также, что длительное время изменения  $\kappa$  после приложения электрического

поля может определяться подвижностью молекул красителя при их поворотах в полимерной матрице. Механизм этого явления подобен эффекту Фредерикса [12,13].

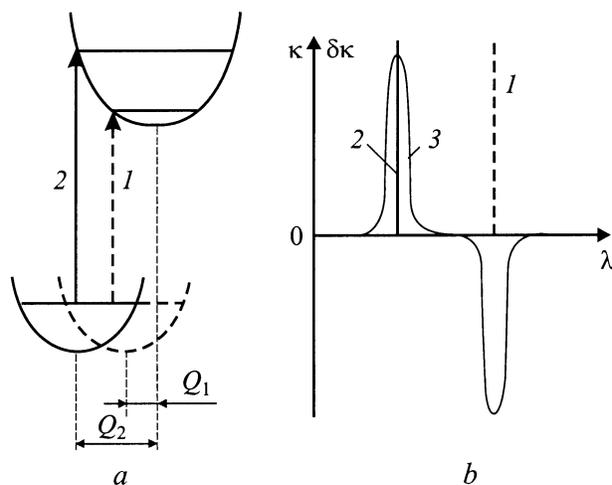
В случае красителей из второй и третьей групп время изменения спектров поглощения после приложения электрического поля мало и определяется поляризацией электронных оболочек молекул красителей. Механизм этого состоит в перераспределении электронной плотности между концевыми частями  $\pi$ -сопряженной системы. Поэтому особенности зависимостей  $\delta\kappa(\lambda)$  обусловлены электронной структурой и симметрией молекул красителей. Последнее поясним с помощью энергетических диаграмм основного и возбужденного состояний молекулы красителя.

На рис. 10, *a* вертикальными стрелками изображены электронные переходы в молекуле красителей второй группы из основного в первое возбужденное состояние до приложения внешнего электрического поля (переход 1) и в электрическом поле (переход 2). В электрическом поле происходит смещение электронной плотности по сравнению с первоначальным равновесным положением относительно ядер атомов, образующих молекулу. В результате первоначально несимметричное распределение электронной плотности между концевыми частями молекулы усредняется по всей структуре молекулы, что можно представить как усреднение электронной плотности по областям вблизи ядер атомов. Поэтому минимум потенциальной энергии электронного невозбужденного состояния сближается с таким же минимумом возбужденного состояния. На рис. 10, *a* разница положений минимумов основного и возбужденного состояний без влияния внешнего электрического поля обозначена как обобщенная координата  $Q_1$ , а под влиянием поля — как  $Q_2$ . На рис. 10, *b* схематически изображены линии поглощения для электронных переходов без электрического поля (1) и в электрическом поле (2), соответствующие переходам 1 и 2 на рис. 10, *a*, а также ожидаемое изменение спектра поглощения рассматриваемого несимметричного полиметинового красителя в электрическом поле  $\delta\kappa(\lambda)$  (кривая 3). Отметим, что порядок чередования положительных и отрицательных максимумов графика зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  на рис. 10, *b* соответствует таковому (рис. 8) для полимерных пленок с красителями из второй группы.

Для симметричных красителей третьей группы характерным является равномерное распределение электронной плотности по концевым частям  $\pi$ -сопряженной системы молекулы в основном состоянии. Во внешнем электрическом поле эта симметрия нарушается из-за смещения электронной плотности вдоль силовых линий электрического поля. Поэтому минимум потенциальной энергии электронного невозбужденного состояния удаляется от минимума возбужденного состояния. Для этого случая на рис. 11, *a* показаны электронные переходы между основным и возбужденным состояниями без электрического поля (1) и в электрическом поле (2), а на рис. 11, *b* представлены линии поглощения для



**Рис. 10.** Энергетические диаграммы и электронные переходы в молекуле красителей второй группы (*a*) и зависимости  $\kappa(\lambda)$ ,  $\delta\kappa(\lambda)$  для этих переходов (*b*).



**Рис. 11.** Энергетические диаграммы и электронные переходы в молекуле красителей третьей группы (*a*) и зависимости  $\kappa(\lambda)$ ,  $\delta\kappa(\lambda)$  для этих переходов (*b*).

электронных переходов без электрического поля (1), в электрическом поле (2) и ожидаемое изменение спектра поглощения рассматриваемого симметричного полиметинового красителя в электрическом поле  $\delta\kappa(\lambda)$  (кривая 3). Здесь отметим, что порядок чередования положительных и отрицательных максимумов графика зависимости  $\delta\kappa(\lambda)$  на рис. 11, *b* соответствует таковому (рис. 9) для полимерных пленок с симметричными красителями из третьей группы.

Таким образом, для пленок всех трех групп красителей в электрическом поле наблюдаются изменения спектров поглощения в области длинноволнового максимума поглощения красителя. Эти изменения могут быть объяснены смещением электронной плотности в пространстве под действием электрического поля. Сле-

довательно, после приложения внешнего электрического поля в полимерных пленках возникает анизотропия распределения дипольных моментов электронных переходов внутри молекул красителя. Последнее может привести к преимущественному выходу носителей заряда при фотогенерации из молекул красителя в АМП в направлении силовых линий внешнего электрического поля. Поэтому следует ожидать, что в допированных АМП с ростом напряженности внешнего электрического поля может увеличиваться квантовый выход фотогенерации ЭДП из центров фотогенерации из-за наведенной анизотропии самих центров фотогенерации.

## Список литературы

- [1] Н.Г. Кувшинский, Н.А. Давиденко, В.М. Комко. Физика аморфных молекулярных полупроводников. Лыбидь, Киев (1994). 176 с.
- [2] M. Pope, C.E. Swenberg. Processes in Organic Crystals. Clarendon Press, Oxford (1982). 725 p.
- [3] L. Onsager. Phys. Rev. **54**, 5, 554 (1938).
- [4] В.М. Гольданский, Л.И. Трахтенберг, В.Н. Флеров. Туннельные явления в химической физике. Наука, М. (1986). 296 с.
- [5] К.И. Замираев, Р. Хайрутдинов, В.П. Жданов. Туннелирование электрона в химии. Наука, М. (1985). 312 с.
- [6] N.A. Davidenko, G.N. Kuvshinsky. J. Inf. Rec. Mats. **21**, 612 (1994).
- [7] N.A. Davidenko, A.A. Ishchenko. Chem. Phys. **247**, 237 (1999).
- [8] N.A. Davidenko, A.K. Kadashchuk, N.G. Kuvshinsky, N.I. Ostapenko, N.V. Lukashenko. J. Inf. Recording **24**, 327 (1996).
- [9] А.К. Кадашук, Н.И. Остапенко, Н.А. Давиденко, Н.Г. Кувшинский, Н.В. Лукашенко. ФТТ **39**, 7, 1183 (1997).
- [10] Н.А. Давиденко, А.А. Ищенко, А.К. Кадашук, Н.Г. Кувшинский, Н.И. Остапенко, Ю.А. Скрышевский. ФТТ **41**, 2, 203 (1999).
- [11] Н.А. Давиденко, А.А. Ищенко. Журн. науч. и прикл. фотографии **44**, 5, 56 (1999).
- [12] Л.М. Блинов. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. Наука, М. (1978). 384 с.
- [13] С. Келих. Молекулярная нелинейная оптика. Наука, М. (1981). 671 с.
- [14] А.А. Ищенко. Строение и спектрально-люминесцентные свойства полиметиновых красителей. Наук. думка, Киев (1994). 232 с.
- [15] Ch. Reichardt. Chem. Rev. **94**, 8, 2319 (1994).
- [16] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. Т. 3. Квантовая механика (нерелятивистская теория). 4-е изд. Наука, М. (1989). 768 с.