ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, 2019, том 53, № 1, с. 45–53

РАДИАЦИОННАЯ ХИМИЯ

УДК 539.196

ДИССОЦИАЦИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ ТЕТРАЦИАНОХИНОДИМЕТАНА (TCNQ) НА ПОВЕРХНОСТИ КАМЕРЫ ИОНИЗАЦИИ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ЗАХВАТЕ МЕДЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2019 г. Л. З. Хатымова[a], *, В. Г. Лукин[a], Г. М. Туймедов[a], О. Г. Хвостенко[a]

[a] *Институт физики молекул и кристаллов – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук*

Россия 450075, Уфа, Проспект Октября, 151

**E-mail: lesya0706@ya.ru*

Поступила в редакцию 09.03.2018 г.
После доработки 26.07.2018 г.
Принята к публикации 30.08.2018 г.

Записан масс-спектр отрицательных ионов резонансного захвата электронов молекулами TCNQ – известного акцептора электронов с целью выявления процессов диссоциации отрицательных молекулярных ионов TCNQ на поверхности камеры ионизации при тепловых энергиях электронов, присоединяемых к молекулам. Получено, что отрицательные молекулярные ионы TCNQ, образующиеся предварительно в газовой фазе в нескольких резонансных максимумах, достигают стенок камеры ионизации благодаря большому времени жизни относительно автоотщепления добавочного электрона: от 25000 микросекунд в первом резонансе при нулевой энергии электронов до 200 микросекунд в резонансе при 3.3 эВ и диссоциируют там, что происходит в результате воздействия поверхности на энергетический баланс процесса диссоциации. Учитывался тот факт, что без влияния поверхности на энергетический баланс данная диссоциация была бы невозможна ввиду недостаточности энергии захваченного молекулой электрона. На основе расчетов B3LYP/6-311G определены наиболее вероятные каналы диссоциации для тех отрицательных фрагментарных ионов, для которых возможны разные брутто-формулы. Полученные данные могут быть использованы при решении проблем, связанных со свойствами молекулы TCNQ при взаимодействии с проводящей поверхностью металлической подложки в электронных устройствах.

Ключевые слова: тетрацианохинодиметан, резонансный захват электронов молекулами, диссоциация отрицательных молекулярных ионов на поверхности

DOI: 10.1134/S0023119319010054

ВВЕДЕНИЕ

Тетрацианохинодиметан (tetracyanoquinodimethane, TCNQ) – известный органический полупроводник, который интенсивно исследуется с середины прошлого века и по настоящее время [1, 2]. TCNQ используется в разнообразных устройствах молекулярной электроники, таких, как светодиоды [3], полевые транзисторы [4], фотоэлектрические ячейки [5], магниты на базе органических соединений [6] и в других [7, 8]. Главным свойством этого соединения является большое сродство к электрону молекулы, составляющее 2.8 эВ [9], что обеспечивает способность TCNQ образовывать комплексы с переносом заряда при взаимодействии с различными органическими донорами электронов, такими, например, как тетратиафульвен. Подобные комплексы составляют основу органических полупроводников с высокой проводимостью, сравнимой с проводимостью металлов [10]. В то же время, свойство TCNQ эффективно присоединять добавочный электрон создает проблему, связанную со стабильностью TCNQ в электронном устройстве. Материал на основе TCNQ и его производных может подвергаться разрушению за счет диссоциации отрицательных молекулярных ионов (M^-) TCNQ, образующихся в результате присоединения медленных электронов к молекулам TCNQ, т.е. в процессах диссоциативного захвата электронов (**ДЗЭ**) молекулами. Соображения о возможности разрушения материала на основе TCNQ через диссоциацию M^- были сформулированы, в частности, в работе [11], где было подчеркнуто, что разложение TCNQ-субстрата в устройстве может происходить на поверхности

металлической подложки по той причине, что металл по отношению к TCNQ способен служит донором электронов. Соответственно в работе [11] была высказана мысль, что для понимания процессов разложения TCNQ на поверхности необходимы исследования процессов ДЗЭ молекулами TCNQ в газовой фазе, в связи с чем авторами было проведено исследование TCNQ методом масс-спектрометрии отрицательных ионов резонансного захвата электронов (**МСОИРЗЭ**) и получено, что диссоциация M^- TCNQ осуществляется по разным каналам преимущественно с захватом электронов, обладающих энергиями ($E_{эл}$), близкими к 4 эВ. При этом один канал диссоциации с образованием фрагментарных отрицательных ионов (**ФОИ**) массового числа m/z 179 был зарегистрирован при $E_{эл} \approx 0$ эВ, который по расчетам энергетического баланса, проведенного в работе [11], не должен был бы реализоваться при такой малой энергии захваченного электрона. Авторами работы, о появлении ФОИ m/z 179 при $E_{эл} \approx 0$ эВ, было высказано несколько предположений: а) примесь; б) термическое разложение вещества на горячей поверхности (катод или стенки камеры ионизации (**КИ**)); в) разложение на поверхности камеры ионизации отрицательного молекулярного иона M^- TCNQ. Чтобы выяснить, какой именно из перечисленных процессов обеспечивает появление нулевых ФОИ в масс-спектре ОИРЗЭ TCNQ, нами было проведено исследование TCNQ с помощью аналогичной приборной техники, но с применением специальной настройки источника ионов, позволяющей увеличивать относительную интенсивность нулевых ФОИ. В результате, помимо уже известных из работы [11] нулевых ФОИ m/z 179, зарегистрированы не наблюдавшиеся ранее нулевые максимумы еще нескольких типов ФОИ и сделан вывод о предпочтительности последнего предположения, касающегося диссоциации на поверхности молекулярных ионов, предварительно сформировавшихся в газовой фазе по резонансному механизму. С помощью расчетов B3LYP/6-311G были проведены оценки энергетически наиболее выгодных каналов диссоциации, обеспечивающих образование нулевых ФОИ, в тех случаях, когда таких каналов для данного массового числа может быть больше одного.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Масс-спектры ДЗЭ TCNQ были записаны на масс-спектрометре МИ-1201В, реконструированном для регистрации отрицательных ионов в режиме РЗЭ молекулами [12]. Прибор этого типа был создан ранее уфимской группой под руководством профессора В.И. Хвостенко [13], основные принципы работы и главные характеристики которого описаны в обзоре [14]. Образец молекулы TCNQ чистотой 98% был получен от компании “Aldrich”.

В настоящей работе настройка источника была откорректирована за счет увеличения напряжения на вытягивающей линзе до 70 В. Это обеспечило увеличение интенсивности ФОИ, образующихся при $E_{эл} \approx 0$ эВ, по сравнению с интенсивностью таких ионов, регистрируемой при стандартной настройке источника с напряжением на вытягивающем электроде в 30–40 В. Хотя в этом случае имеет место некоторая дискриминация в отношении высокоэнергетичных максимумов, в частности, в отношении максимумов при $E_{эл} \approx 4$ эВ, доминирующих в масс-спектре ОИ TCNQ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе с использованием прибора, описанного в разделе “Экспериментальная часть”, записан масс-спектр ОИРЗЭ TCNQ. Кривые эффективного выхода отрицательных ионов, составивших полученный масс-спектр, а именно, – молекулярных M^- (m/z 204) и фрагментарных (m/z 203, 180, 179, 178, 177, 176, 164, 154, 153, 140, 139, 115, 114 и 26) представлены на рис. 1. Долгоживущие молекулярные ионы M^- (m/z 204) TCNQ, образуются в области $E_{эл} = 0$–3.3 эВ в нескольких резонансных состояниях: при $E_{эл} = 0$, 0.5, 1.4 и 3.3 эВ, с временами жизни относительно автоотщепления добавочного электрона (τ_a) от ~25000 мкс при $E_{эл} = 0$ эВ до ~200 мкс при $E_{эл} = 3.3$ эВ. Это в целом согласуется с результатами работы [11], так же, как и с данными, полученными впервые для TCNQ Комптоном в 1977 г. [15]. Ионы M^- в данном случае являются долгоживущими, благодаря чему регистрируются непосредственно. Однако, несмотря на довольно большие значения τ_a, время жизни указанных ионов все же ограничено, что проявляется в наличии нейтральной компоненты (204 N), которая возникает в результате автоотщепления добавочного электрона от ионов M^-. Та часть нейтральной компоненты, которая появилась в результате автоотщепления электронов от M^- во второй бесполевой области, расположенной после магнита-анализатора, достигает умножителя и регистрируется при удалении из потока частиц ионной компоненты за счет включения напряжения на отклоняющих пластинах. Соответственно, записывается КЭВ нейтральной компоненты. В данном случае КЭВ 204 N также была записана и показана на рис. 1.

Провести сравнение масс-спектров ОИРЗЭ TCNQ, полученных в настоящей работе и в работах [11] и [15], позволяет табл. 1. В ней приведены относительные интенсивности максимальных по интенсивности ионных пиков, вычисленные в процентном отношении к максимуму КЭВ ионов

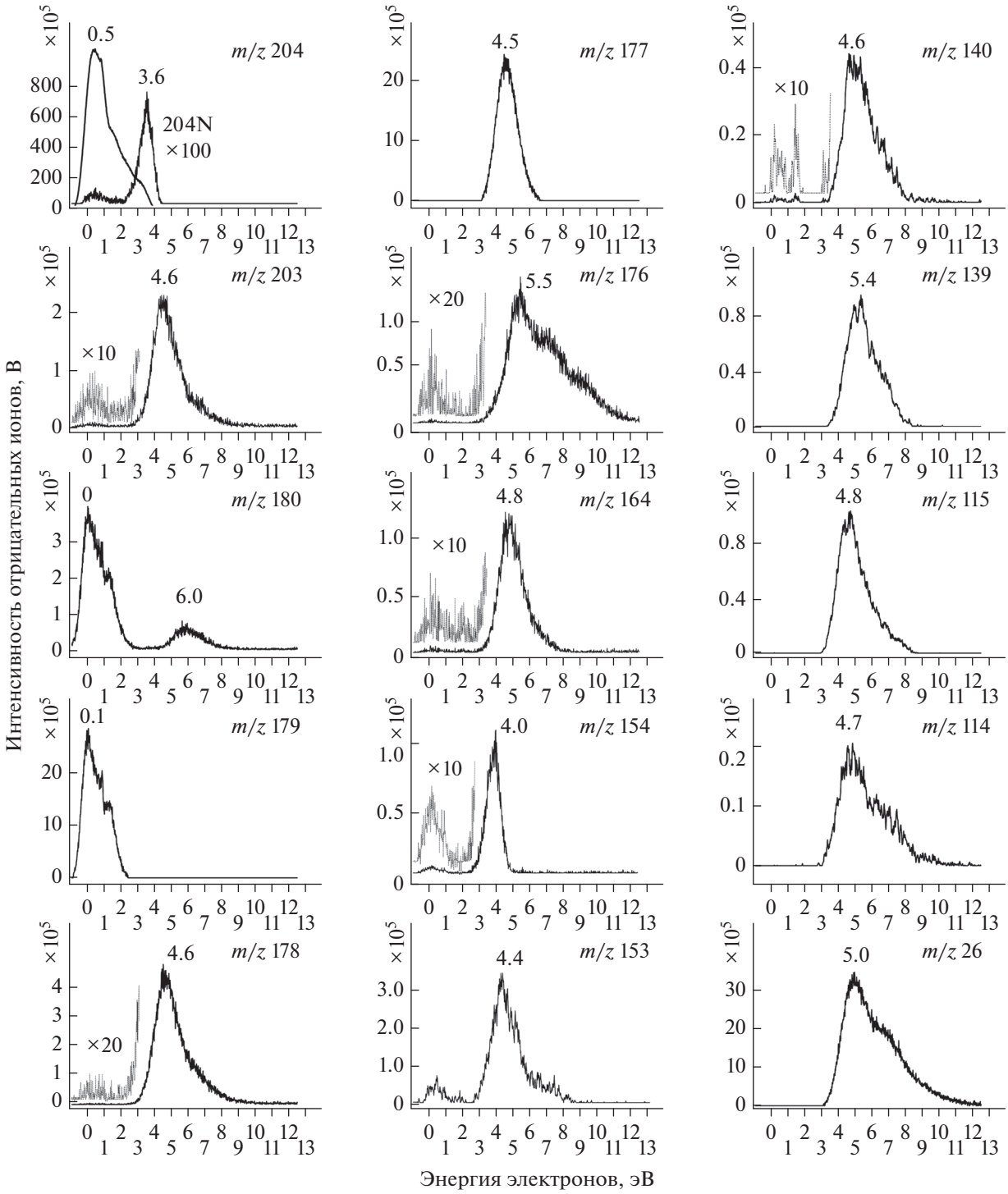

Рис. 1. Кривые эффективного выхода отрицательных ионов из масс-спектра ОИРЗЭ TCNQ.

M^- при $E_{эл} = 0.5$ эВ, который был принят за 100%. Из табл. 1 видно, что ионный состав масс-спектров ОИРЗЭ TCNQ, полученных в настоящей работе и в работе [11] в общих чертах совпадает. Однако, имеются отличия. Нами не зарегистрированы ФОИ m/z 189 при $E_{эл} \approx 4$ эВ, представленные в работе [11], по причине их малой интенсивности и нашей настройки ИИ в пользу нулевых. В то же время в настоящей работе записаны ФОИ m/z 180, 176 и 154, которые не были отмечены в работе [11].

Еще одно отличие состоит в том, что нами записаны максимумы КЭВ ряда ионов в области

Таблица 1. Масс-спектр отрицательных ионов резонансного захвата электронов молекулами TCNQ. $E_{эл}$ – энергия электронов; I, % – относительная интенсивность отрицательных ионов, представленная относительно максимального значения пика m/z 204 при $E_{эл}$ = 0.5 эВ; звездочкой отмечено “плечо” на кривой эффективного выхода

m/z	Структура фрагментарного иона	Настоящая работа		Литературные данные			
				[11]		[15]	
		$E_{эл}$, эВ	I, %	$E_{эл}$, эВ	I, %	$E_{эл}$, эВ	I, %
204	M^-	0* 0.5 1.4* 3.3*	– 100 – –	0 * 0.3 1.3* 3.0*	– 100 – –	0 0.7* 1.3* 3.2*	– – – –
203	$[M-H]^-$	4.6	0.2	3.8	0.1	–	–
189	$[M-CH_3]^-$	–	–	4.1	<0.1	–	–
180	$[M-C_2]^-$	0.0 6.0	0.4 0.1	– –	– –	– –	– –
179	$[M-C_2H]^-$	0.1	2.7	0	1.7	–	–
178	$[M-C_2H_2]^-$ или $[M-CN]^-$	4.48	0.4	4.0	0.1	–	–
177	$[M-HCN]^-$ или $[M-C_2H_3]^-$	4.27	2.3	4.0	1.4	3.2	–
176	$[M-C_2H_4]^-$	5.04	0.1	–	–	–	–
164	$[M-CN_2]^-$	4.8	0.1	4.4	0.1	–	–
154	$[M-C_4H_2]^-$ или $[M-C_3N]^-$	0.16 4.0	0.01 0.1	– –	– –	– –	– –
153.6	Метастабильный ион 204 → 177	–	–	3.3	0.1	–	–
153	$[M-C_3NH]^-$ или $[M-C_4H_3]^-$	0.13 4.4	0.03 0.3	– 4.0	– 0.2	– –	– –
140	$[M-C(CN)_2]^-$	4.6	0.04	4.6	<0.1	–	–
139	$[M-CH(CN)_2]^-$	5.4	0.1	4.7	<0.1	–	–
115	$[M-C_2H-C(CN)_2]^-$	4.8	0.1	4.2	<0.1	–	–
114	$[M-C_2H-CH(CN)_2]^-$	4.7	0.02	4.2	<0.1	–	–
26	CN^-	– – 5.0 6.3*	– – 3.2 2.0*	– – 4.5 6.3*	– – 2.0 –	0 1.4 4.5 –	– – – –

$E_{эл} \approx 0$ эВ, не зарегистрированные в предыдущих исследованиях. К таковым относятся интенсивный максимум при $E_{эл} \approx 0$ эВ на КЭВ ионов m/z 180, а также слабоинтенсивные максимумы в этой же области на КЭВ ионов m/z 203, 178, 176, 164, 154, 153 и 140. Описанные различия указывают на то, что в области $E_{эл} \approx 0$ эВ наблюдаются явления, которые не укладываются в стандартную картину процесса ДЗЭ.

Природу этих нестандартных явлений позволяют раскрыть результаты, полученные ранее в работах [16–19], где было показано, что, если молекулы исследуемого соединения образуют долгоживущие ионы M^- (как это имеет место в случае TCNQ), то некоторая часть из их числа, в силу своего достаточно большого времени жизни, достигает поверхности КИ, где адсорбируется. При этом существует лишь вероятность нейтрализа-

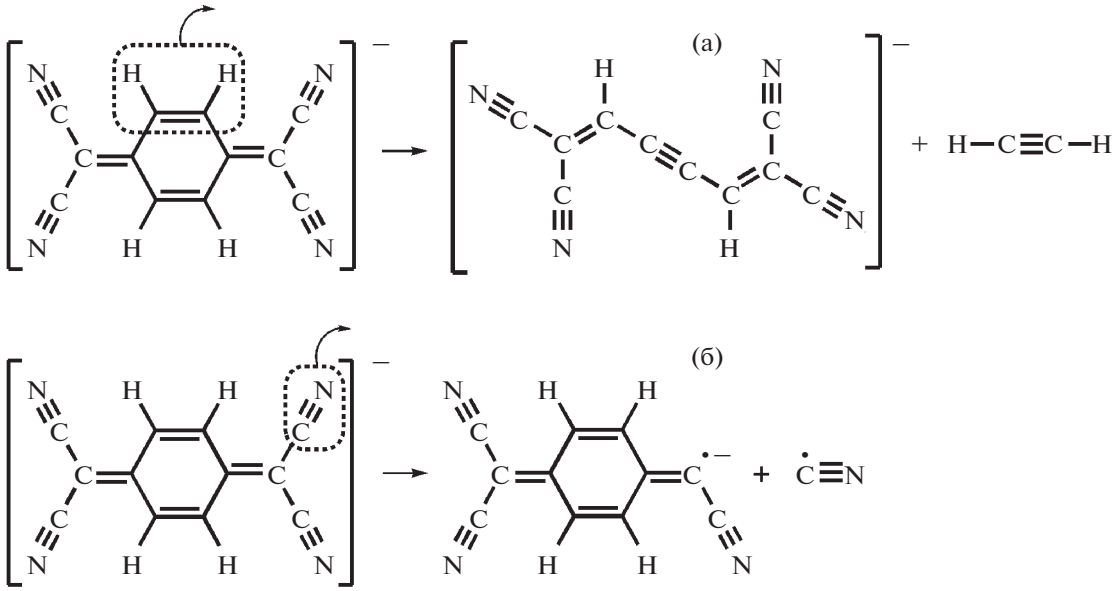

Рис. 2. Схемы двух возможных путей образования фрагментарного отрицательного иона *m/z* 178,(а) $[M-C_2H_2]^-$, (б) $[M-CN]^-$.

ции этих ионов на поверхности. Поэтому только часть из них нейтрализуется. Другая часть выживает и стабилизуется там до “вечноживущих” (относительно автоотщепления электрона). Дальнейшая судьба выживших ионов тоже неодинакова: часть из них десорбируется обратно в вакуум, вливаясь в общий поток регистрируемых ионов и, как это было показано в работах [16–19], представленная стабильными ионами, искажает тем самым измеряемое время жизни τ_a ионов M^-.

Развивая эту концепцию далее, на основе данных настоящей работы можно предположить, что другая часть выживших и находящихся на поверхности молекулярных ионов M^-, способна диссоциировать под влиянием поверхности, причем, очевидно, что КЭВ образующихся таким образом ФОИ должны в определенной степени повторять КЭВ долгоживущих молекулярных ионов M^-.

Из рис. 1 видно, что КЭВ ФОИ в области $E_{эл}$ = = 0–3.3 эВ действительно очень близко повторяют КЭВ ионов M^-. В газовой фазе эти ФОИ не могут образовываться при таких малых энергиях, привносимых в молекулу захваченным электроном, как это было точно оценено для ФОИ *m/z* 179 в работе [11]. Очевидно, поверхность оказывает влияние на энергетический баланс диссоциации, сдвигая его в пользу образования соответствующего ФОИ. Механизм этого влияния поверхности будет рассмотрен нами в дальнейшем.

Среди массовых чисел ФОИ, зарегистрированных в настоящей работе, имеется по меньшей мере четыре, которым соответствует по меньшей мере два возможных канала диссоциации. Это – *m/z* 178, 177, 154 и 153. Схемы возможных путей диссоциации для этих пяти типов ФОИ представлены на рис. 2–5. Для того чтобы определить, какой из каналов в каждом случае является более вероятным, были проведены расчеты B3LYP/6-311+G(*d, p*) полных энергий ФОИ одной из выбранных структур и соответствующего нейтрального осколка (**НО**). Результаты представлены в табл. 2.

Согласно брутто формуле, для ФОИ *m/z* 178 возможны два разных канала: $[M-C_2H_2]^-$ и $[M-CN]^-$. Для оценки энергетического преимущества одного из них, были сделаны расчеты энергий образованного ФОИ и нейтрального фрагмента в обоих случаях. В результате образование ФОИ $[M-C_2H_2]^-$, который является псевдо-молекулярным ионом с открытой оболочкой (имеет один неспаренный электрон), оказалось более выгодным, чем образование “обычного” ФОИ с закрытой оболочкой $[M-CN]^-$. Основанием для этого вывода служит тот факт, что в первом случае $E(\Sigma)$ – суммарная расчетная полная энергия двух продуктов диссоциации (ФОИ и НО) на ~1 эВ меньше, чем во втором. А само преимущество первого варианта диссоциации обусловлено тем, что при реализации первого варианта диссоциации нейтральный фрагмент выбрасывается в виде молекулы (ацетилена, рис. 2а), в то время как при реализации второго нейтральный фрагмент уходит в виде радикала CN (рис. 2б).

Известно, что образование нейтрального фрагмента в виде молекулы дает зачастую большой энергетический выигрыш всему процессу, как это

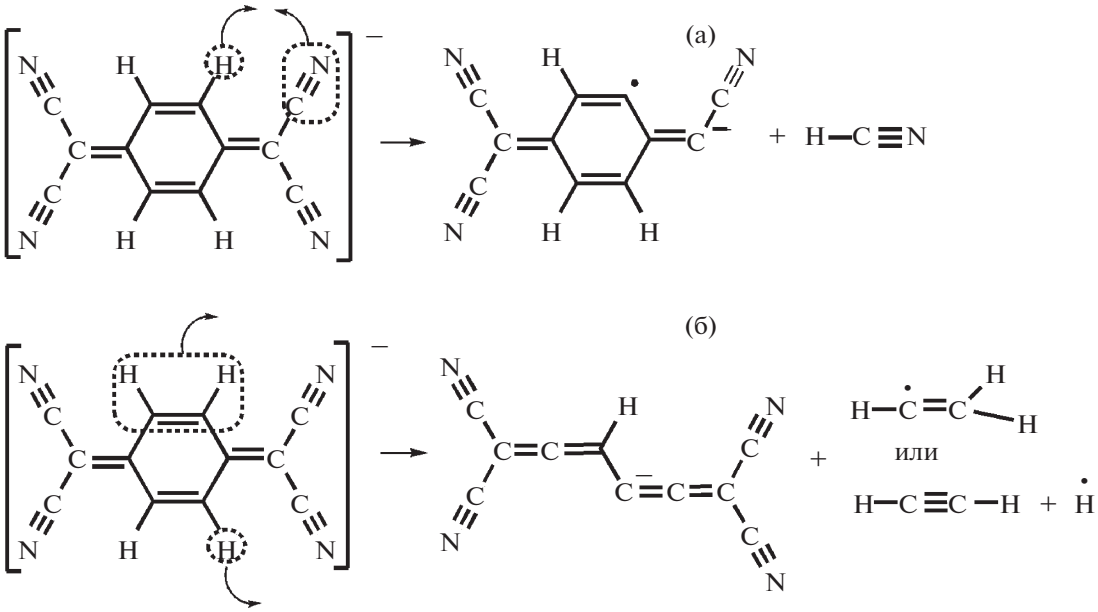

Рис. 3. Схемы возможных путей образования фрагментарного отрицательного иона *m/z* 177, (а) $[M-HCN]^-$, (б) $[M-C_2H_3]^-$.

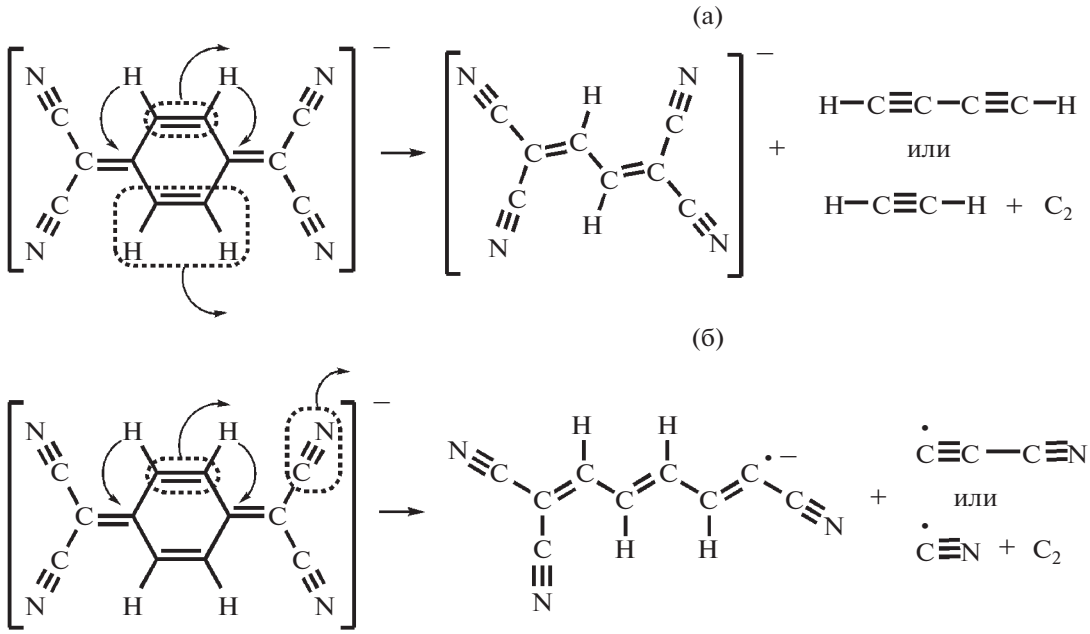

Рис. 4. Схемы возможных путей образования фрагментарного отрицательного иона *m/z* 154, (а) $[M-C_4H_2]^-$, (б) $[M-C_3N]^-$.

было показано при анализе процессов диссоциации отрицательного молекулярного иона *пара*-бензохинона [20]. В табл. 2 каналы распада, отмеченные как более вероятные по величине $E(\Sigma)$, выделены жирным шрифтом.

В случае *m/z* 177 также возможны два разных канала диссоциации: $[M-HCN]^-$ и $[M-C_2H_3]^-$, причем здесь образование фрагментов в виде иона-радикала с неспаренным электроном $[M-HCN]^-$ и нейтрального осколка в виде молекулы HCN

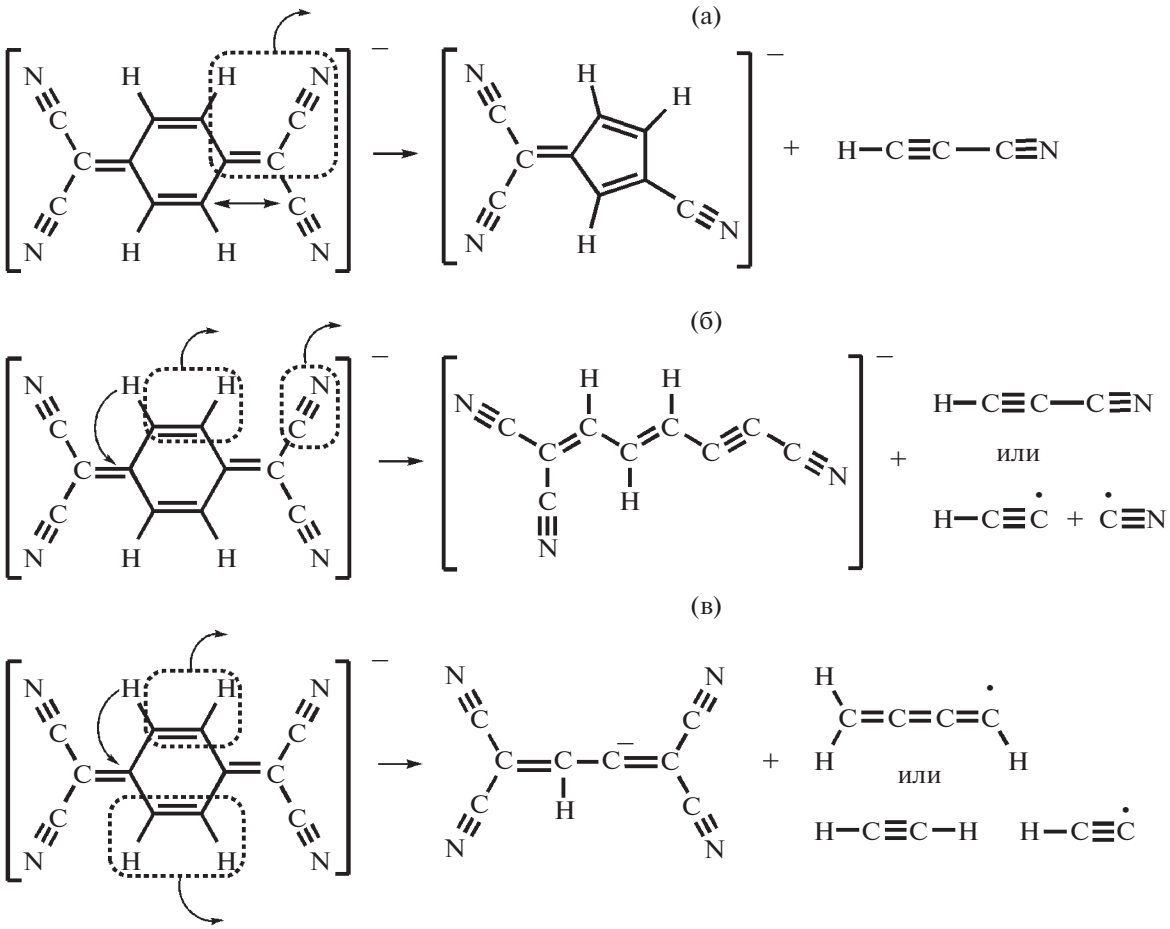

Рис. 5. Схемы возможных путей образования фрагментарного отрицательного иона *m/z* 153, (а), (б) $[M-C_3NH]^-$ и (в) $[M-C_4H_3]^-$.

(рис. 3а) также более выгодно, как по количеству разрывов связей M^-, так и по величине $E(\Sigma)$. Последняя здесь на ~2 эВ меньше (табл. 2), чем она же в случае образования "обычного" ФОИ с закрытой оболочкой $[M-C_2H_3]^-$ и нейтрального фрагмента, независимо от формы последнего – радикала C_2H_3, что по результатам расчетов более выгодно, или молекулы ацетилена и радикала H (C_2H_2–H) (рис. 3б).

Для фрагментарных ионов *m/z* 154 возможны каналы диссоциации $[M-C_4H_2]^-$ и $[M-C_3N]^-$. Распад на ФОИ $[M-C_3N]^-$ и нейтральный радикал C_3N менее вероятен, чем диссоциация по первому каналу, хотя для этого требуется меньшее число разрывов связей M^- (рис. 4б). Причина преимущества первого канала в том, что в случае его реализации помимо псевдо-молекулярного ФОИ с открытой оболочкой $[M-C_4H_2]^-$, образуется нейтральный фрагмент в виде молекулы диацетилена C_4H_2 (рис. 4а), который обеспечивает значительный выигрыш по энергии. В итоге первый канал имеет преимущество по сравнению со вторым в величине $E(\Sigma)$ на ~4 эВ (табл. 2). Следует отметить также, что для реализации первого канала необходим перегруппировочный процесс с образованием новой химической связи между двумя противолежащими атомами углерода шестичленного цикла, что, вообще говоря, маловероятно в МСОИРЗЭ ввиду ограниченного времени жизни молекулярного иона M^-. Но если учесть, что данный ФОИ образуется, очевидно, на поверхности камеры ионизации, где адсорбированный отрицательный молекулярный ион стабилизуется до "вечноживущего", как это было показано в работах [16–19], ограничения по времени на перегруппировки снимаются, и необходимые перестройки остова в процессе диссоциации становятся возможными.

Возможны два варианта ФОИ *m/z* 153: $[M-C_3NH]^-$ и $[M-C_4H_3]^-$. При изучении канала $[M-C_3NH]^-$ выяснилось, что возможны два пути образования такого ФОИ (рис. 5 а, б). В первом случае, ФОИ *m/z* 153 образуется в виде пятичленного цикла (рис. 5а), а во втором должен произойти

Таблица 2. Расчеты B3LYP/6-311+G(*d*, *p*) энергий фрагментарных ионов *E*(ФОИ) из масс-спектра отрицательных ионов резонансного захвата электронов молекулами TCNQ и соответствующих нейтральных осколков *E*(НО); *E* (Σ) – суммарная расчетная полная энергия двух продуктов диссоциации (ФОИ и НО)

m/z	Структура фрагментарного иона	*E*(ФОИ), эВ	*E*(НО), эВ		*E*(Σ), эВ
178	**$[M-C_2H_2]^-$**	**−16364.01**	**C_2H_2**	**−2104.95**	**−18468.96**
	$[M-CN]^-$	−15944.34	CN	−2523.52	−18467.86
177	**$[M-HCN]^-$**	**−15925.61**	**HCN**	**−2542.99**	**−18468.60**
	$[M-C_2H_3]^-$	−16346.46	C_2H_3	−2120.35	−18466.81
			$C_2H_2 + H$	−2118.61	−18465.07
154	**$[M-C_4H_2]^-$**	**−14291.44**	**C_4H_2**	**−4177.73**	**−18469.17**
			$C_2H_2 + C_2$	−4170.31	−18461.75
	$[M-C_3N]^-$	−13869.54	C_3N	−4595.80	−18465.34
			$C_2 + CN$	−4588.88	−18458.42
153	**$[M-C_3NH]^-$**	**−13854.74** (рис. 5а)	**C_3NH**	**−4615.63**	**−18470.37**
		−13851.75 (рис. 5б)	C_3NH	−4615.63	−18467.38
			$C_2H + CN$	−4608.72	−18460.47
	$[M-C_4H_3]^-$	−14272.22	C_4H_3	−4193.03	−18465.25
			$C_2H_2 + C_2H$	−4190.15	−18462.37

разрыв шестичленного цикла (рис. 5б). По расчету *E*(Σ) первый вариант энергетически более выгоден, чем второй как минимум на ~3 эВ (табл. 2). И еще менее выгоден вариант $[M-C_4H_3]^-$ (рис. 5в), здесь уже на ~5 эВ, даже в случае объединения нейтрального фрагмента в единую структуру радикала C_4H_3 (табл. 2). Таким образом, по данным расчета суммарной энергии *E*(Σ) фрагментарный ион *m/z* 153 вероятнее всего образуется по схеме, представленной на рис. 5а как псевдо-молекулярный ФОИ с открытой оболочкой, с пятичленным циклом в своей структуре и с молекулой HC_3N в качестве нейтрального фрагмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Записан масс-спектр ОИРЗЭ известного электронного акцептора TCNQ. Выдвинута концепция диссоциации отрицательных молекулярных ионов M^- TCNQ на поверхности камеры ионизации, образующихся первоначально по резонансному механизму при тепловых энергиях электронов, захваченных молекулами. Предполагается, что на поверхности диссоциируют ионы M^- TCNQ, которые после своего образования в газовой фазе достигают стенок камеры ионизации благодаря достаточно большому времени жизни относительно автоотщепления добавочного электрона и адсорбируются там. Диссоциация на поверхности происходит при малой энергии захваченных электронов, которой было бы недостаточно для диссоциации в газовой фазе. На поверхности распад ионов M^- TCNQ происходит за счет воздействия поверхности на молекулярный ион, которое выражается в сдвиге энергетического баланса диссоциации до необходимого предела. Для отрицательных фрагментарных ионов с массовыми числами 178, 177, 154 и 153, для которых возможны разные брутто-формулы, на основе расчетов B3LYP/6-311G определены наиболее вероятные каналы диссоциации. Полученные данные необходимы при решении проблем, связанных со стабильностью материалов на основе TCNQ при их взаимодействии с поверхностью подложки в различных устройствах молекулярной электроники.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и Республики Башкортостан в рамках научного проекта № 17-42-020643.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Acker D.S., Harder R.J., Hertler W.R., Mahler W., Melby L.R., Benson R.E., Mochel W.E.* 7 // J. Am. Chem. Soc. 1960. 82. P. 6408.
2. *Brooks J.S.* // Chem. Soc. Rev. 2010. 39. P. 2667.
3. *Koh W.K., Shin T., Jung C., Cho K.-S.* // Chem. Phys. Chem. 2016. 17. P. 1095.

4. *Wang C., Dong H., Hu W., Liu Y., Zhu D.* // Chem. Rev. 2011. 112. P. 2208.
5. *Tang C.W.* // Appl. Phys. Lett. 1986. 48. P. 183.
6. *Zhang X., Saber M.R., Prosvirin A.P., Reibenspies J.H., Sun L., Ballesteros-Rivas M., Zhao H., Dunbar K.R.* // Inorg. Chem. Front. 2015. 2. P. 904.
7. *Forrest S.R., Thompson M.E.* // Chem. Rev. 2007. 107. P. 923.
8. *Friend R.H., Gymer R.W., Holmes A.B., Burroughes J.H., Marks R.N., Taliani C., Bradley D.D.C., Dos Santos D.A., Brédas J.L., Logdlund M., Salaneck W.R.* // Electroluminescence in Conjugated Polymers. Nature. 1999. 397. P. 121.
9. *Klots C.E., Compton R.N., Raaen V.F.* // J. Chem. Phys. 1974. 60. P. 1177.
10. *Ferraris J., Cowan D.O., Walatka V., Perlstein J.H.* // J. Am. Chem. Soc. 1973. 95(3). P. 948.
11. *Pshenichnyuk S.A., Modelli A., Lazneva E.F. and Komolov A.S.* // J. Phys. Chem. 2014. V. 118. P. 6810.
12. *Лукин В.Г.* // ПТЭ. 2013. № 5. С. 77.
13. *Хатымова Л.З., Мазунов В.А., Хатымов Р.В.* // История науки и техники. 2011. № 3. С. 11.
14. *Khvostenko V.I., Tolstikov G.A.* // Russ. Chem. Rev. 1976. V. 45. P. 127.
15. *Compton R.N., Cooper C.D.* // J. Chem. Phys. 1977. V. 66. №. 10. P. 4325.
16. *Лукин В.Г., Хвостенко О.Г.* // УФН. 2017. Т. 187. № 9. С. 981.
17. *Lukin V.G., Khvostenko O.G., Tuimedov G.M.* // Int. J. Mass Spectrom. 2016. V. 399–400. P. 17.
18. *Лукин В.Г., Хвостенко О.Г., Туймедов Г.М.* // Журн. технической физики. 2017. Т. 87. № 7. С. 982.
19. *Лукин В.Г., Хвостенко О.Г., Туймедов Г.М.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 4. С. 96.
20. *Khvostenko O.G., Shchukin P.V., Tuimedov G.M., Muftakhov M.V., Tseplin E.E., Tseplina S.N., Mazunov V.A.* // Int. J. Mass Spectrom. 2008. V. 273. P. 69.