

УДК 62.506.2

В. П. ЛЕОНОВ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ МЕХАНИЗМОВ
В ЭЛЕКТРОХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЯЧЕЙКЕ. С О О Б Щ Е Н И Е 3.
ТОРМОЖЕНИЕ**

В нервных системах живых организмов широко распространены тормозные эффекты, которые наряду с возбуждением выполняют важные логические функции в общем процессе преобразования информации. Пресинаптическое торможение выражается в блокаде или подавлении пресинаптических возбуждающих импульсов и обусловлено активацией пресинаптических тормозных бляшек [1]. Этот вид торможения распространен во всей центральной нервной системе млекопитающих и имеет большую эффективность в сравнении с постсинаптическим, которое выражается в кратковременной гиперполяризации мембраны мотонейрона под действием импульсов, поступающих через тормозные синапсы.

Сравнительно большая длительность постсинаптического торможения создает возможность для пространственной и временной суммации тормозных эффектов [2]. При слишком быстром приходе последовательных импульсов к миелиевому синапсу наблюдается сильное угнетение синаптической передачи. Этот вид торможения называют торможением Введенского.

Для моделирования тормозных эффектов в электронных моделях нейронов используются отдельные блоки торможения [3,

4], что существенно усложняет модели. Как отмечалось ранее [5, 6], в электрохемилюминесцентной (ЭХЛ) ячейке вместе с другими нейронными механизмами можно воспроизводить и торможение. Преимущества такого воспроизведения заключаются в возможности использования свойств молекул, участвующих в ЭХЛ процессе, или особенностей кинетики данного явления для воспроизведения нейронных механизмов без усложне-

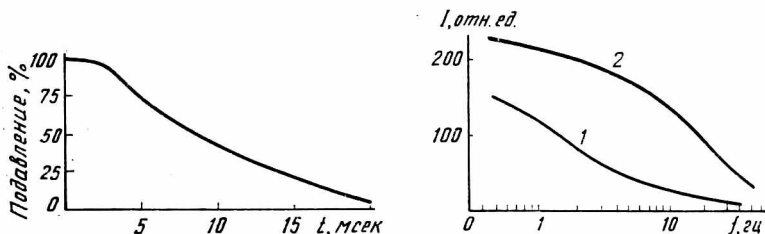


Рис. 1. Зависимость подавления вспышки ЭХЛ тормозящим импульсом от интервала времени между тормозящим и возбуждающим импульсами.

Рис. 2. Зависимость интенсивности вспышек ЭХЛ от частоты следования возбуждающих импульсов при их длительности 50 (1) и 10 мсек (2).

ния модели новыми элементами. Тормозные эффекты, сходные с описанными выше, были обнаружены в ЭХЛ композиции с активным электролитом тетрафенилборнатрием (ТФБН) и активатором 1,5-дифенил-3-стирилпиразолином (ДФСП). В данной работе рассматривается возможность воспроизведения тормозных эффектов в ЭХЛ ячейке.

В экспериментах использовался раствор ДФСР 0,1 и ТФБН 0,2 моль/л в диметилформамиде. Раствор заливался в ячейку с платиновыми электродами. Рабочий электрод в виде проволоки диаметром 0,8 мм располагался внутри цилиндрического дополнительного электрода с разрезом для выхода света. Регистрировалась ЭХЛ фотоэлектронным умножителем, соединенным со входом запоминающего осциллографа.

Свечение в данной ЭХЛ композиции можно возбуждать однопольярными положительными импульсами. Однако если перед положительным импульсом на рабочий электрод поступит отрицательный, то наблюдается подавление вспышки ЭХЛ. На рис. 1 приведена зависимость подавления вспышки ЭХЛ тормозящим отрицательным импульсом длительностью 30 мсек и амплитудой 3,5 в. Возбуждающие положительные импульсы имели длительность 10 мсек и амплитуду 2,5 в. При уменьшении амплитуды и длительности отрицательных импульсов их тормозящее действие снижалось. Как видно из рис. 1, тормозящее действие отрицательного импульса сохраняется до 20 мсек. Это создает возможность для временного суммирования тормозящих импульсов. Если в ЭХЛ ячейку будет введено несколько электродов, на

которые относительно рабочего электрода будут поступать положительные импульсы, то будет происходить также пространственное суммирование тормозных сигналов. Данный вид торможения в ЭХЛ ячейке имеет сходство с пресинаптическим и постсинаптическим торможением.

Другой вид торможения наблюдается в ЭХЛ ячейке в виде зависимости интенсивности вспышек ЭХЛ от частоты и длительности возбуждающих импульсов. Этот вид торможения аналогичен торможению Введенского. На рис. 2 приведены зависимости интенсивности вспышек ЭХЛ от частоты следования возбуждающих импульсов при их длительности 50 и 10 мсек. Как видно из рис. 2, увеличение длительности и частоты следования возбуждающих импульсов снижает уровень оптического сигнала — вспышки ЭХЛ, т. е. наблюдается торможение.

Рассмотрим причину появления тормозных эффектов в ЭХЛ ячейке с данной композицией. Как известно [7], интенсивность вспышки ЭХЛ для ион-рекомбинационного механизма описывается выражением

$$I = \Phi_{\text{эхл}} A (D\tau_a)^2 K C^+ C^-,$$

где $\Phi_{\text{эхл}}$ — квантовый выход ЭХЛ; A — площадь электрода; D — коэффициент диффузии; τ_a — аннигиляционное время жизни ион-радикалов; K — константа аннигиляции; C^+ и C^- — концентрации ион-радикалов.

Как видно из выражения (*), интенсивность вспышки ЭХЛ прямо пропорциональна концентрации C^+ и C^- . В данном примере это концентрации катион-радикалов ДФСР и анион-радикалов ТФБН.

Ранее было показано [5], что в ЭХЛ композициях с активным электролитом ТФБН образуются люминесцирующие комплексы из катион-радикалов активатора R^+ и анионов электролита \mathcal{E}^- у поверхности положительного электрода в следующей последовательности реакций: $R - e \rightarrow R^+$, $R^+ + \mathcal{E}^- \rightarrow (R\mathcal{E})^+$, $(R\mathcal{E})^+ \rightarrow h\nu + R + \mathcal{E}$. Если на рабочий электролит подать отрицательный потенциал, не превышающий потенциала восстановления ДФСР, то его приэлектродная концентрация не изменится, поскольку молекулы ДФСР электронейтральны. Анионы ТФБН будут мигрировать от электрода под действием кулоновского отталкивания от электрода. Приэлектродная концентрация анионов ТФБН упадет до нуля ($C^- = 0$) и положительный импульс с амплитудой, достаточной для окисления ДФСР, в начальный момент не будет сопровождаться вспышкой ЭХЛ. При наличии интервала времени между тормозящим и возбуждающим импульсом приэлектродная концентрация C^- будет восстанавливаться диффузией и, как видно из рис. 1, через 20 мсек она восстанавливается полностью.

Торможение, показанное на рис. 2, также обусловлено миграцией анионов ТФБН у электрода. Но в данном случае торможение вызвано снижением приэлектродной концентрации не ТФБН, а ДФСР. Возбуждающий положительный импульс вызывает миграцию анионов ТФБН в рабочему электроду и вытеснение молекул ДФСР из приэлектродного слоя.

Если частота и длительность возбуждающих импульсов невелика ($f < 10$ гц, $T = 10$ мсек), то в интервалах между импульсами диффузионные процессы успевают восполнить приэлектродное пространство молекулами ДФСР и уменьшить приэлектродную концентрацию анионов ТФБН до исходного значения. При возрастании длительности и частоты следования возбуждающих импульсов исходные значения концентраций ДФСР и анионов ТФБН не успевают восстанавливаться в интервалах между импульсами и наступает торможение — снижение интенсивности вспышек ЭХЛ.

В рассматриваемой ЭХЛ композиции наблюдается еще один специфический эффект, который может использоваться для моделирования торможения. Он заключается в смещении спектра излучения ЭХЛ при изменении параметров возбуждающего напряжения. В растворе с концентрацией ДФСР и ТФБН по 0,2 моль/л возбуждение ЭХЛ проводилось чередующимися положительными ($V^+ = 1,5 - 5$ в, $t^+ = 0,5$ сек) и отрицательными ($V^- = 3,5$ в, $t^- = 0,15$ сек) прямоугольными импульсами.

При амплитуде положительного импульса 2,2 в максимум спектра ЭХЛ расположен на 518 нм. Увеличение амплитуды положительного импульса до 4 и 5 в сопровождается смещением максимума спектра ЭХЛ на 564 и 590 нм соответственно. Если сигнал от ЭХЛ ячейки регистрируется избирательным фотоприемником, чувствительным в зеленой области спектра, то при увеличении амплитуды возбуждающих положительных импульсов спектр излучения ЭХЛ будет уходить из области чувствительности фотоприемника. В результате сигнал на выходе фотоприемника будет падать, что эквивалентно торможению. Природа данного смещения спектров ЭХЛ представляет собой самостоятельную задачу и может быть рассмотрена в отдельной работе.

Таким образом, в ЭХЛ композиции с активным электролитом ТФБН и активатором ДФСР имеется несколько видов торможения. Наблюдается подавление вспышек ЭХЛ отрицательными импульсами, снижение интенсивности ЭХЛ при увеличении длительности и частоты следования возбуждающих импульсов, смещение спектра ЭХЛ при изменении амплитуды возбуждающих импульсов. Учитывая, что в ЭХЛ ячейке воспроизводятся и другие свойства нейрона, следует полагать, что на основе ЭХЛ ячейки можно построить модель нейрона с довольно полным воспроизведением свойств ее биологического прототипа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экклс Д. ж. Физиология синапсов. М., «Мир», 1966. 396 с.
2. Экклс Д. ж. Физиология нервных клеток. М., Изд-во иностр. лит., 1959. 298 с.
3. Снежко Е. М. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Днепропетровск, 1972. 20 с.
4. Позин Н. В. Моделирование нейронных структур. М., «Наука», 1970. 260 с.
5. Леонов В. П. Моделирование нейронных механизмов в электрохемилуминесцентной ячейке. *Сообщение 1. Механизмы электрохемилуминесценции.* — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 16. Харьков, 1976, с. 136—140.
6. Леонов В. П. Моделирование нейронных механизмов в электрохемилуминесцентной ячейке. *Сообщение 2. Адаптация.* — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 16, Харьков, 1976, с. 136—140.
7. Measures R. M. Prospects for Developing a Laser Based on Electrochemiluminescence. — «Applied Optics», 1974, v. 13, p. 1121—1133.

Поступила 15 июля 1975 г.