

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ МЕХАНИЗМОВ В ЭЛЕКТРОХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЯЧЕЙКЕ. СООБЩЕНИЕ 2. АДАПТАЦИЯ

Важным свойством биологических систем является адаптация — приспособление к внешним условиям. На уровне нейронов адаптация проявляется в смещении мембранного потенциала в одну или другую сторону, следствием чего есть изменение порога возбудимости нервной клетки. Смещение порога ведет к изменению частоты генерирования импульсов нейроном. В [1] показано, что деполяризующий и гиперполяризующий токи, приложенные через внутриклеточный электрод, вызывают реакции, зеркально отражающие друг друга, т. е. смещение мембранного потенциала может вести и к ускорению, и к замедлению импульсных процессов в нейронной сети. В данной работе показана возможность моделирования адаптационных свойств нейрона в электрохемилюминесцентной (ЭХЛ) ячейке.

Ранее отмечалось [2], что модель нейрона с применением ЭХЛ ячейки состоит из двух частей пространственно-временного ЭХЛ сумматора и порогового генератора импульсов с оптическим входом. Исходя из этой структуры модели нейрона, воспроизведение адаптационных свойств можно получить путем управления интенсивностью вспышек ЭХЛ при одном и том же входном синаптическом воздействии. Такое управление имеется в ЭХЛ ячейке, если в нее ввести дополнительный электрод и включить источник постоянного напряжения между рабочим и дополнительным электродами. Как указывалось в [3], возбуждение ЭХЛ при этом осуществляется однополярными электрическими импульсами.

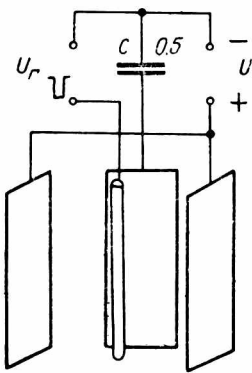


Рис. 1. Схема расположения электродов в ячейке и их подключение к источникам напряжения.

Исследование адаптационных свойств проводилось в ЭХЛ ячейке с четырьмя электродами. Схема их расположения и подключение к источникам напряжения показано на рис. 1. Рабочим электродом служил платиновый штывь диаметром 1 мм. Он располагался между тремя платиновыми пластинками. Две из них соединены электрически между собой и подключены к положительному полюсу источника постоянного напряжения. Другой полюс источника напряжения подключается к третьему пластинчатому электроду через конденсатор и к одной из клемм генератора прямоугольных импульсов. Вторая клемма генератора была соединена с рабочим электродом.

Другой полюс источника напряжения подключается к третьему пластинчатому электроду через конденсатор и к одной из клемм генератора прямоугольных импульсов. Вторая клемма генератора была соединена с рабочим электродом.

Такая схема включения источников постоянного и импульсного напряжений позволяла получать более интенсивные вспышки ЭХЛ, чем другие варианты доключения источников напряжения к электродам. ЭХЛ композиция содержала активатор — 1,5-дифенил-3-стирилпиразолин (ДФСП) в концентрации 0,01 моль/л и электролит — хлористый литий 0,04 моль/л. Растворителем служил очищенный диметилформамид. Конструкция ячейки позволяла измерять потенциал рабочего электрода относительно каломельного электрода сравнения. Интенсивность ЭХЛ регистрировалась ФЭУ-27, соединенным со входом запоминающего осциллографа С1-29.

Потенциал рабочего электрода относительно каломельного, измеренный в процессе работы, был несколько меньше постоянного напряжения источника питания и возрастал при его увеличении. Рабочий электрод с источником постоянного напряжения непосредственно не связан, следовательно, постоянное напряжение попадает на него через внутреннее сопротивление генератора импульсов. Таким образом, ЭХЛ возникает на отрицательно поляризованном рабочем электроде в те моменты, когда на него поступают отрицательные импульсы напряжения. Остается неясным, каким образом появляются возбужденные молекулы активатора.

В [3] высказывалось предположение, что свечение ЭХЛ при таком способе возбуждения определяется переносом электрона между нон-радикалами в растворе, но не показано, как появляются нон-радикалы активатора. Поэтому следует остановиться на механизме образования нон-радикалов и возбужденных молекул при рассматриваемом способе возбуждения ЭХЛ.

Когда на рабочий электрод подано отрицательное напряжение, его поверхностьный слой обедняется отрицательно заряженными ионами хлора и обогащается катионами лития. Молекулы активатора электрически нейтральны, и их концентрация в приэлектродном слое не должна изменяться. Если напряжение на рабочем электроде превышает потенциал восстановления активатора, то появляются его анион-радикалы  $R^-$ , которые под действием кулоновского взаимодействия мигрируют от электрода в раствор. Известно, что в растворе ионы существуют в сольватных оболочках дипольных молекул или окружены другими ионами, образующими ионную атмосферу.

В приэлектродном слое присутствуют катионы лития и анион-радикалы активатора. Они и будут центрами сольватации дипольных молекул растворителя и активатора. Поскольку в приэлектродном слое имеются центры сольватации, заряженные положительно и отрицательно, то дипольные молекулы активатора будут взаимодействовать с ними различными своими полюсами. Некоторые молекулы активатора могут одновременно участвовать в двух сольватных оболочках. Положительным полюсом они будут связаны с анион-радикалом активатора, а отрицательным — с катионом лития. Назовем такие молекулы активатора дисольватированными.

Подача отрицательного импульса на отрицательно поляризованный электрод ускоряет движение центров сольватации различного знака в противоположные стороны, а дисольватированная молекула активатора подвергается растягивающему действию двух электрических сил. Катионы лития по размерам значительно уступают молекулам активатора и обладают более высокой подвижностью, чем последние. Поэтому движущийся катион лития не может увлечь за собой дисольватированную молекулу активатора, но может оторвать от нее электрон. В результате образуются катион-радикалы активатора в приэлектродном объеме раствора. Дисольватированная молекула активатора, оставшаяся без электрона, превращается в катион-радикал, взаимодействует со своим отрицательным центром сольватации, и становятся возможными реакции  $R^+ + R^- \rightarrow R^* + R$ ,  $R^* \rightarrow h\nu + R$ .

Описанный механизм образования катион-радикалов и возбужденных молекул позволяет объяснить отсутствие запаздывания импульсов ЭХЛ по отношению к электрическим импульсам при рассматриваемом способе возбуждения. Предельная скорость образования возбужденных молекул при этом будет ограничена, по-видимому, временем релаксации ионных атмосфер и сольватных оболочек. Время релаксации ионной атмосферы можно оценить по формуле [4]:

$$\tau = \frac{8,85 \cdot 10^{-11}}{c \cdot \Lambda_{\infty}} \cdot D,$$

где  $c$  — концентрация;  $\Lambda_{\infty}$  — эквивалентная электропроводность данного электролита при бесконечном разведении;  $D$  — диэлектрическая проницаемость растворителя. Оценка времени релаксации по этой формуле для ЭХЛ композиции с приведенными выше концентрациями компонент дала значение  $\tau \approx 5 \cdot 10^{-9}$  сек.

Экспериментальные зависимости интенсивности ЭХЛ от амплитуды отрицательных импульсов при наличии постоянного поляризующего напряжения приведены на рис. 2. Длительность возбуждающих импульсов была равна 1 мсек, частота следования 20 гц. Следует отметить, что ЭХЛ не возникала при отдельной подаче поляризующего и импульсного напряжений. Вспышка ЭХЛ появлялась после достижения поляризующим напряжением потенциала окисления активатора.

Как видно из рис. 2, увеличение поляризующего напряжения от 4 до 6 в приводит к значительному росту интенсивности ЭХЛ, что обусловлено ростом количества анион-радикалов в приэлектродном слое. Свечение возрастает линейно при увеличении амплитуды возбуждающих импульсов до 8 в. Это может быть связано с расширением приэлектродного слоя, в котором образуются возбужденные молекулы. При достижении возбуждающими импульсами амплитуды 8 в возбужденные молекулы образуются по всей толщине приэлектродного слоя, в котором имеются анион-радикалы активатора. В результате наступает насыщение. Приведенные зависимости показывают, что с помощью источника по-

стоянного напряжения можно изменять уровень оптического сигнала ЭХЛ ячейки в широких пределах при одной и той же амплитуде возбуждающих электрических импульсов. Это свойство ЭХЛ ячейки позволяет воспроизводить в ней адаптационные свойства нейрона.

Кроме ЭХЛ композиций с ион-рекомбинационным механизмом образования возбужденных молекул, для моделирования адапта-

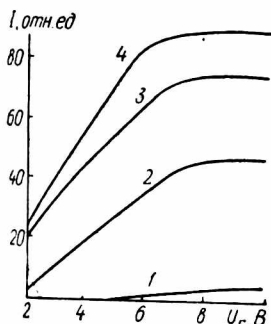


Рис. 2. Зависимость интенсивности ЭХЛ от величины возбуждающих импульсов при постоянном напряжении поляризации 4 в (1), 4,5 в (2), 5 в (3), 6 в (4).

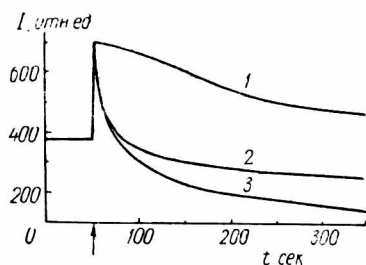


Рис. 3. Изменение интенсивности ЭХЛ во времени при амплитуде возбуждающих импульсов 3,5 в. Стрелкой показан момент включения постоянного напряжения величиной: 2 в (1), 2,2 в (2), 2,4 в (3).

ции может использоваться ЭХЛ композиция с активным электролитом тетрафенилборнатрием (ТФБН). Как показано в (5), свечение в ней возбуждается однополярными положительными импульсами и обусловлено излучательными переходами эксиплексов. Активатором в данной ЭХЛ композиции служил ДФСР. Концентрации электролита и активатора составляли соответственно 0,2 и 0,1 моль/л.

Воспроизведение адаптационных свойств исследовалось в ячейке с тремя электродами в виде пластинок, расположенных в одной плоскости. Источник постоянного напряжения включался между двумя дополнительными электродами, а импульсное напряжение прикладывалось между плюсовым дополнительным и рабочим электродами. Прямоугольные импульсы длительностью 5 мсек подавались на ячейку с частотой 1 гц. Изменение интенсивности ЭХЛ во времени при включении постоянного напряжения адаптации приведено на рис. 3. В отсутствие постоянного напряжения на рабочем электроде имелись вспышки ЭХЛ величиной 380 отн. ед. После подключения постоянного напряжения интенсивность ЭХЛ резко возрастала, но затем медленно спадала до определенного уровня. Скорость спада интенсивности ЭХЛ зависела от величины постоянного напряжения адаптации и возрастала при его увеличении.

Аналогичные явления можно наблюдать и в биологических системах, когда после некоторого периода повышенной активности наступает депрессия. Механизм образования возбужденных молекул в ЭХЛ композиции с активным электролитом ТФБН не отличается в случае возбуждения свечения постоянным напряжением или постоянным и импульсным напряжениями совместно. Люминесцирующие молекулы представляют собой эксиплексы, образованные из анионов электролита и катион-радикалов активатора.

Вместе с адаптационными свойствами ЭХЛ ячейка позволяет воспроизводить кратковременную память и пространственное суммирование электрических сигналов [2]. В ЭХЛ ячейке существуют тормозные эффекты, проявляющиеся в снижении интенсивности вспышек ЭХЛ при возрастании частоты возбуждающих сигналов. Процессы торможения в ЭХЛ ячейке заслуживают отдельного рассмотрения. Приведенный перечень нейронных механизмов, которые воспроизводятся в ЭХЛ ячейке, позволяет считать перспективным ее применение для построения логических элементов бионического типа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экклс Д. ж. Физиология синапсов. М., «Мир», 1966. 396 с.
2. Огороднейчук И. Ф., Леонов В. П., Бых А. И. К построению электрохемилуминесцентной модели нейрона. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 13, Харьков, 1974, с. 82—86.
3. Бых А. И., Воевода Л. В., Худенский Ю. К. Об одной возможности создания быстродействующей электрохимической модели нейрона. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 5, Харьков, 1970, с. 50—53.
4. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия. М., «Высшая школа», 1969, 510 с.
5. Леонов В. П. Моделирование нейронных механизмов в электрохемилуминесцентной ячейке. Сообщение 1. Механизмы электрохемилуминесценции. См. статью в настоящем сборнике.

*Поступила 3 августа 1974 г.*