

УДК 62.506.2

И. Ф. ОГОРОДНЕЙЧУК, канд. техн. наук,
В. П. ЛЕОНОВ, А. И. БЫХ

К ПОСТРОЕНИЮ ЭЛЕКТРОХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ МОДЕЛИ НЕЙРОНА

При моделировании нервных клеток перспективным является использование процессов в электрохимических системах. Процессы в электрохимических моделях, как и в реальных нервных клетках, протекают в электролитах. Эта аналогия позволяет строить модели с внутренними процессами, более близкими к процессам в биологических нейронах. Одна из таких моделей предложена Теорелло [1]. Она генерирует почти прямоугольный потенциал действия при пропускании тока через стеклянную полупроницаемую мембрану, разделяющую два раствора электролита различной концентрации. Модель может применяться для воспроизведения процесса генерации импульса нейроном.

Другой тип модели был построен с помощью управляемых электрохимических сопротивлений (мемисторов) [2]. Они используются в качестве простых и надежных элементов памяти, а также как регуляторы синаптических весов и позволяют строить самообучающиеся модели. Последние могут найти применение для синтеза самоорганизующихся нейронных сетей.

В [3] описана электрохимическая модель нервной клетки, принцип работы которой основан на распространении электрических волн по железным проводам, погруженным в азотную кислоту.

Реализованные по этому принципу модели аналогичны нервным клеткам, так как и те и другие имеют период рефрактерности и стабильный порог возбуждения, осуществляют суммирование сигналов на подпороговом уровне, а скорость распространения в них импульса почти равна скорости в реальных нейронах.

С помощью этой модели построены логически полные функции вычислительных устройств. Размеры отдельных элементов модели могут приближаться к молекулярным. Их единственный существенный недостаток заключается в большом времени восстановления — около 15 минут.

Ранее указывалось на возможность использовать явление электрохемилюминесценции (ЭХЛ) в моделировании нервных клеток [4]. Главное преимущество ЭХЛ состоит в том, что в объеме одной ячейки одновременно протекают химические, электрические и оптические процессы. Ячейка ЭХЛ имеет электрический и оптический каналы, по которым может вводиться или выводиться информация. В ячейку для реализации сложных функций может быть введено большое количество электродов. Положительным является и то, что ЭХЛ протекает в тонком слое на поверхности электродов, а это позволяет выполнять устройство микроминиатюрным. На основании всего этого использование ЭХЛ в моделировании нервных клеток можно считать перспективным.

В предлагаемой работе исследовались интегрирующие и запоминающие свойства ЭХЛ-элементов, которые могут непосредственно применяться в моделях нейронов.

Любая электрохимическая ячейка может в принципе интегрировать электрический ток [5]. Это связано с тем, что весовое количество вещества m (окислившегося или восстановившегося), прореагировавшего за время t на любом из электродов, пропорционально количеству электричества, прошедшего через ячейку за это же время. Данный процесс описывается видоизмененной формулой первого закона Фарадея

$$m = \frac{E_x}{F} \int_0^t i dt, \quad (1)$$

где E_x — химический эквивалент вещества.

Процессы ЭХЛ связаны с образованием ион-радикалов люминесцирующего вещества у электродов.

В соответствии с выражением (1) количество ион-радикалов, которое пропорционально их массе, зависит от силы пропускаемого тока i и времени пропускания t . Однако мерой интегрального значения при этом будет не концентрационная э. д. с., как в случае электрохимических интегрирующих диодов, а яркость световой вспышки ЭХЛ.

В работе использовалась ЭХЛ-композиция, содержащая растворенные в очищенном диметилформамиде активатор — карбазол $8 \cdot 10^{-3}$ м — и фоновый электролит — хлористый литий

0,05 м. Композиция заливалась в стеклянную ячейку объемом 1 мл с двумя платиновыми электродами. Рабочий электрод — штырь диаметром 1 мм располагался коаксиально внутри дополнительного, выполненного в виде цилиндра диаметром 8 мм и высотой 1 см с разрезом для выхода света. К электродам прикладывалось напряжение формы (рис. 1, а). Световой импульс появлялся только во время катодной фазы на рабочем электроде (рис. 1, б). Во время действия положительного импульса с амплитудой U_1 превышающей потенциал окисления активатора, и длительностью T_1 у поверхности рабочего электрода образуются катион-радикалы карбазола A^+ . Они имеют определенное время существования

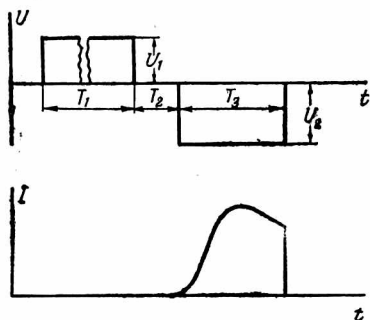


Рис. 1. Форма напряжения возбуждения (а) и светового импульса (б).

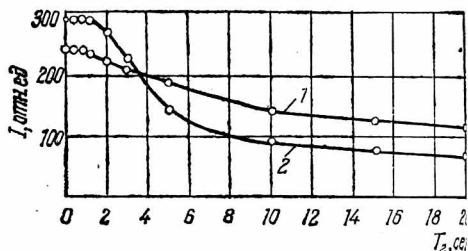
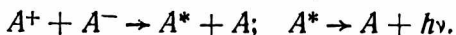


Рис. 2. Зависимость интенсивности ЭХЛ карбазола (1), дифенилстирилпиразолина (2) от длительности интервала между записывающим и считывающим импульсами.

и сохраняются в течение некоторого периода после прекращения действия катодной фазы на рабочем электроде. При подаче отрицательного импульса на рабочий электрод образуются анион-радикалы A^- . Таким образом, во время катодной фазы у рабочего электрода одновременно присутствуют A^+ и A^- , что сопровождается реакцией аннигиляции с образованием возбужденной молекулы которая обладает способностью к излучательной рекомбинации



Время жизни катион-радикалов определяет запоминающие свойства ЭХЛ-элемента. О них можно судить по зависимости интенсивности ЭХЛ от длительности периода T_2 между записывающим (положительным) и считывающим (отрицательным) импульсами (рис. 2) для двух активаторов. Возбуждение ЭХЛ в композиции, содержащей 1,5-дифенил-3-стирилпиразолин (ДФСП) осуществлялось напряжением с параметрами $U_1 = 2,2$ в, $U_2 = 10$ в, $T_1 = 1,0$ сек, $T_2 = 0,2$ сек. Возбуждение ЭХЛ карбазола производилось напряжением с другой амплитудой: $U_1 = 5,5$ в, $U_2 = 6$ в. Как видно из рис. 2, в течение двух секунд сохраняется 90% информации. Разный ход кривых 1 и 2 обусловлен различием времен

жизни катион-радикалов карбазола и ДФСР. Вымирание катион-радикалов активатора можно отождествлять с уменьшением деполаризации мембраны тела клетки нейрона после поступления на нее потенциала действия. Время жизни ион-радикалов различных люминесцирующих веществ длится от нескольких долей секунды до десятков секунд, что позволяет в широких пределах регулировать длительность запоминания.

В ЭХЛ-ячейке можно воспроизвести пространственное суммирование входных сигналов при введении в нее нескольких записывающих электродов. В этом случае число образованных катион-радикалов активатора будет зависеть от того, на какое количество

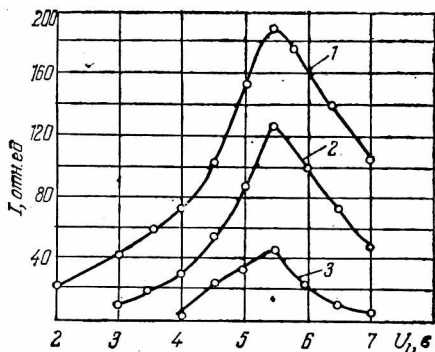


Рис. 3. Зависимость интенсивности ЭХЛ от амплитуды напряжения записывающего импульса:

1 — $U_2 = 6$ в; 2 — $U_3 = 5$ в; 3 — $U_2 = 4$ в.

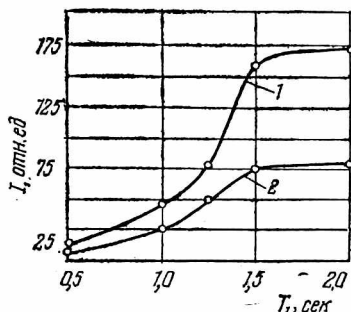


Рис. 4. Зависимость интенсивности ЭХЛ от длительности записывающего импульса:

1 — $T_3 = 0,2$ сек; 2 — $T_3 = 0,31$ сек.

записывающих электродов подан сигнал, так как с увеличением их числа возрастает сила тока, протекающего через рабочий электрод.

Зависимость интенсивности свечения ЭХЛ от амплитуды записывающего импульса показана на рис. 3, из которого следует, что интенсивность ЭХЛ увеличивается пропорционально напряжению подготовительного импульса с последующим уменьшением. Спад ЭХЛ при напряжениях, превышающих 5,5 в, очевидно, обусловлен необратимыми изменениями в молекулах активатора или растворителя. В ЭХЛ-ячейке, наряду с фарадеевским током (активной составляющей), определяющим процесс ЭХЛ, существует также значительный зарядный ток (емкостная составляющая). Расходом энергии на перезарядку емкости двойного электрического слоя, вероятно, и определяется некоторая нелинейность характеристик на рис. 3.

Согласно выражению (1), количество образованных ион-радикалов является функцией времени электролиза. Зависимости интенсивности ЭХЛ от длительности записывающего импульса T_1 приведены на рис. 4. Возрастание интенсивности ЭХЛ при увеличении

T_1 связано с накоплением катион-радикалов активатора у электрода, что повышает вероятность реакции аннигиляции ион-радикалов. Низкая яркость свечения при $T_1 < 0,5$ сек, по всей вероятности, связана с тем, что в первые моменты катодной фазы рабочий электрод имеет очень низкую концентрацию A^+ и, следовательно, небольшую вероятность образования возбужденных молекул. Временные параметры ЭХЛ элемента могут быть значительно улучшены за счет введения дополнительного электрода и включения между ним и рабочим электродом постоянного напряжения подпитки [4].

Таким образом, наличие в ЭХЛ-элементе интегрирующих свойств и кратковременной памяти позволяет реализовать пространственно-временной ЭХЛ-сумматор, в котором выходной сигнал снимается по оптическому каналу. Световой сигнал поступает на пороговый одновибратор с оптическим запуском, который служит генерирующим узлом модели нейрона.

Излучение карбазола наблюдается на длинах волн 400—600 нм (максимальное — на 440 нм), для ДФСР излучение находится в пределах 440—600 нм (максимальное — на 490 нм), т. е. лежит в интервале чувствительности миниатюрных фотоприемников. Для ЭХЛ композиции, содержащей ДФСР, яркость свечения V_{\max} и эффективность η составили соответственно 2500 нит и 0,22%.

Полученная яркость свечения превышает яркость выпускаемых светодиодов. Излучение ЭХЛ в видимой части спектра и высокая яркость свечения позволяют непосредственно согласовывать ЭХЛ элементы с миниатюрными фотоприемниками и строить различные оптоэлектронные многофункциональные элементы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т а с а к и И. Нервное возбуждение. М. «Мир», 1971. 222 с.
2. В о р о н к о в Г. Я. Хемотронные устройства. М., ВНИИЭМ, 1965. 160 с.
3. M i l l e r В. Electrochemical Nerwe Cells Under Study. — «Aviation Week and Space Technology», 1963, vol. 78, N 7, p. 103—112.
4. Б ы х А. И., В о е в о д а Л. В., Х у д е н с к и й Ю. К. Об одной возможности создания быстродействующей электрохимической модели нейрона. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 5. Харьков, 1971, с. 50—53.
5. Ф и ш М. Л. Хемотронные приборы в автоматике. Киев, «Техніка», 1967. 240 с.