

Instytut Fizyki UMCS
Zespół Biofizyki
Kierownik: doc. dr hab. Jadwiga Skierczyńska

Władysław BULANDA, Longin GŁADYSZEWSKI,
Jadwiga SKIERCZYŃSKA

Efekt Halla w komórkach *Nitellopsis obtusa*

Эффект Холла в клетках *Nitellopsis obtusa*

Hall Effect in *Nitellopsis obtusa*

Przeprowadzone w naszym laboratorium badania własności elektrycznych komórek *Characeae* [2, 22, 23] sugerowały istnienie wewnątrz komórki, w pobliżu ścianki, cienkiej warstewki posiadającej charakter półprzewodnikowy.

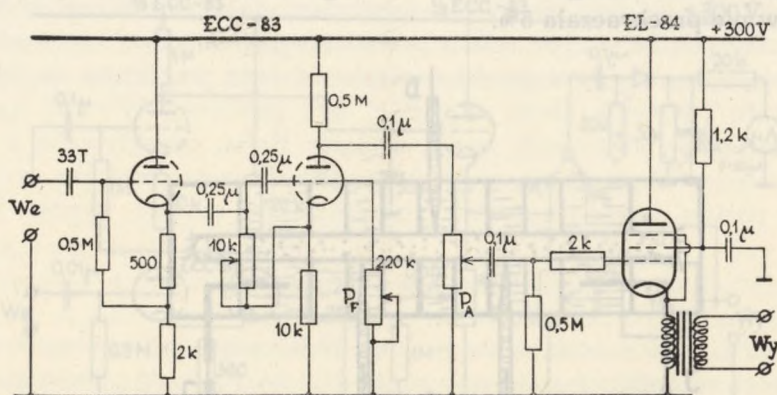
Celem pomiaru napięć Halla było sprawdzenie tej hipotezy.

Prace przedstawiające badania efektu Halla w związkach organicznych nie są zbyt liczne [6, 9, 10, 12, 21, 25]. Bardziej interesujące wyniki tych prac, to określenie znaku i ruchliwości nośników prądu w DNA i polipeptydach; w DNA przewodnictwo jest typu *p* i ruchliwość w granicach 0,5—1 cm²/V.s, w polipeptydach przewodnictwo jest typu *n* i ruchliwość rzędu 2 cm²/V.s. W hemoglobinie stwierdzono zmianę typu przewodnictwa z *p* na *n* przy zwiększonej wilgotności oraz brak efektu Halla po denaturacji mimo istnienia w dalszym ciągu przewodnictwa [25]. O pomiarach efektu Halla w strukturach biologicznych są w piśmiennictwie tylko wzmianki [2, 25]. Wyników tych pomiarów nie bierze się pod uwagę ze względu na bardzo małą ich dokładność.

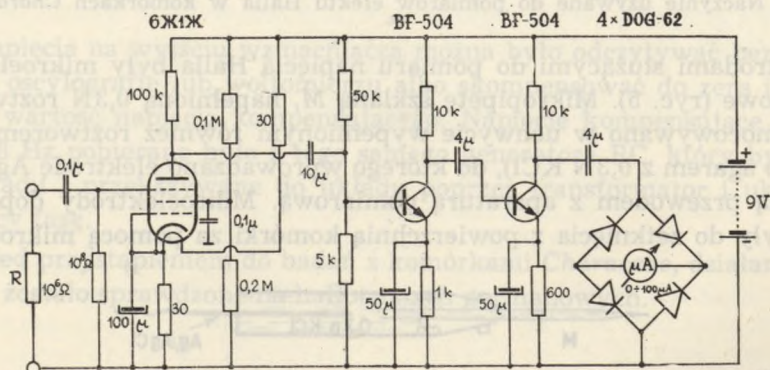
Przeprowadzenie badań efektu Halla w próbkach organicznych napotyka na duże trudności eksperymentalne ze względu na bardzo małą wartość napięcia Halla spowodowaną dużym oporem próbek i małą ruchliwością nośników prądu. Wyniki pomiarów są trudne do interpretacji z powodu silnej ich zależności od czynników zewnętrznych, takich jak temperatura, oświetlenie, wilgotność itp.

Przy badaniach efektu Halla stosuje się wiele różnorodnych metod, aby niewielką wartość napięcia zmierzyć z jak największą dokładnością. Wielu autorów [4, 5, 11, 15, 16, 18, 20, 24] podaje opisy aparatu do po-

wia ryc. 1. Źródłem prądu zmiennego był generator wzorcowy RC; prąd z generatora dostarczany był do obwodu poprzez układ regulacji fazy (ryc. 1 i 2). Zastosowana w pomiarach metoda kompensacyjna wymaga przy prądzie zmiennym dopasowania fazy napięcia kompensowanego i kompensującego, dlatego w obwodzie znajdowały się układy regulacji fazy prądu i napięcia kompensującego. Natężenie prądu płynącego przez komórkę określano ze spadku napięcia na oporniku 200 k Ω lub 1 M Ω połączonym szeregowo z komórką. Napięcie to było mierzone za pomocą elektrometru lampowego, w którym skala przyrządu pomiarowego wycechowana została w mikroamperach (ryc. 1 i 3). Maksymalne natężenie prądu, jakie można było uzyskać na tej aparaturze, wynosiło 3,6 μ A. Komórka znajdowała się w czasie pomiarów w naczyniu przedstawionym na ryc. 4, które wraz z komórką umieszczone było między nabiegunnikami elektro-

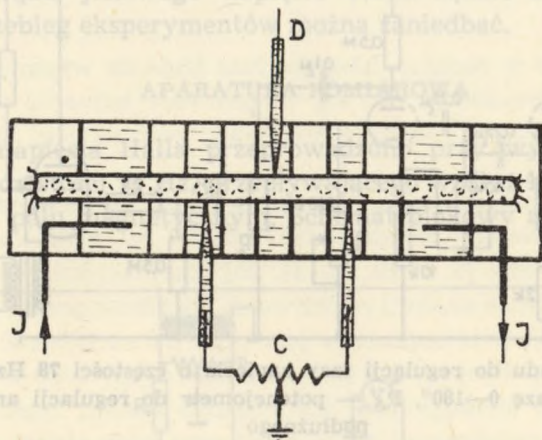


Ryc. 2. Schemat układu do regulacji fazy napięcia o częstotliwości 78 Hz; P_F — potencjometr regulujący fazę 0—180°, P_A — potencjometr do regulacji amplitudy prądu podłużnego



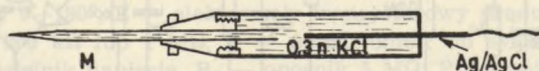
Ryc. 3. Schemat elektrometru do pomiaru natężenia prądu podłużnego

magnesu, posiadającymi średnicę ok. 10 cm. Elektromagnes zasilano prądem stałym z baterii akumulatorów o napięciu 120 V; kierunek i natężenie pola magnetycznego można było zmieniać przez zmianę kierunku i natężenia prądu elektrycznego. Natężenie prądu można było regulować w sposób ciągły, w granicach od 0 do 6,5 A za pomocą układu opornic. Maksymalna wartość indukcji magnetycznej, jaką otrzymano przy możliwie najmniejszej odległości między nabiegunnikami elektromagnesu (0,65 cm) wynosiła 1 T, jednak ze względu na grubość naczynia pomiarowego i zamocowania elektrod hallowskich pomiary przeprowadzono przy odległości 1,3 cm między nabiegunnikami i wtedy maksymalna indukcja magnetyczna wynosiła 0,9 T. Pomiary pola magnetycznego zostały przeprowadzone za pomocą fluksmetru. Wytworzone pole magnetyczne było z dużą dokładnością jednorodne; różnica w wartościach indukcji magnetycznej między środkami nabiegunników i w odległości 1 cm od krawędzi nabiegunników nie przekraczała 5%.



Ryc. 4. Naczynie używane do pomiarów efektu Halla w komórkach *Characeae*

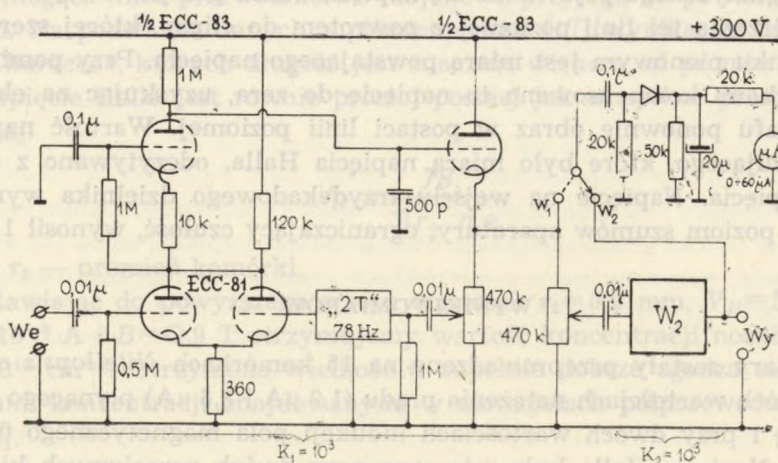
Elektrodami służącymi do pomiaru napięcia Halla były mikroelektrody cieczowe (ryc. 5). Mikropipetę szklaną *M*, napełnioną 0,3N roztworem KCl, zamocowywano w uchwycie wypełnionym również roztworem 0,3N KCl (lub agarem z 0,3N KCl), do którego wprowadzano elektrodę Ag/AgCl połączoną przewodem z aparaturą pomiarową. Mikroelektrody doprowadzane były do zetknięcia z powierzchnią komórki za pomocą mikromanipulatora.



Ryc. 5. Mikroelektroda cieczowa stosowana do pomiaru napięcia; *M* — szklana mikropipeta napełniona 0,3N KCl

pulatorów o możliwości przesuwu w trzech prostopadłych do siebie kierunkach. Ustawienie mikroelektrod kontrolowano przy pomocy mikroskopu. W pomiarach zastosowano metodę trzech elektrod (ryc. 1 i 4), która pozwala uniknąć błędów powstającego przy dwu elektrodach w wyniku niesymetrycznego ich ustawienia. W metodzie trzech elektrod przepuszcza się przez próbkę prąd przed włączeniem pola magnetycznego i przez odpowiednie ustawienie potencjometru P redukuje napięcie między punktami C i D (ryc. 4) do zera (jest to tzw. symetryzacja elektrod).

Napięcie, jakie wytwarzało się po włączeniu pola magnetycznego, przekazywane było z elektrod hallowskich na dwustopniowy wzmacniacz wąskopasmowy o regulowanym w sposób ciągły współczynniku wzmocnienia (ryc. 1 i 6). Maksymalny współczynnik wzmocnienia wynosił 10^6 . War-



Ryc. 6. Schemat ideowy wzmacniacza rezonansowego; W_2 — część wzmacniacza identyczna ze stopniem poprzednim, szczegółowo narysowanym

tość napięcia na wyjściu wzmacniacza można było odczytywać bezpośrednio na oscylografie lub woltomierzu albo skompensować do zera i odczytywać wartość napięcia kompensującego. Napięcie kompensujące o częstotliwości 78 Hz pobierane było z tego samego generatora RC, który był źródłem prądu i przekazywane do układu poprzez transformator i układ regulujący fazę.

Przed przystąpieniem do badań z komórkami *Characeae*, działanie aparatury zostało sprawdzone na hallotronach germanowych.

SPOSÓB PRZEPROWADZANIA POMIARÓW

Komórkę umieszczano w naczyniu pomiarowym i doprowadzano do niej trzy elektrody hallowskie. Przez komórkę przepuszczano prąd zmienny o określonym natężeniu i przy pomocy potencjometru P (ryc. 1) przeprowadzano symetryzację elektrod. Wartość napięcia i przesunięcie fazowe odczytywano na oscylografie. Do wejść x i y oscylografu przykładano napięcie sinusoidalne o częstotliwości 78 Hz — na wejście y napięcie z elektrod hallowskich, na wejście x bezpośrednio z generatora. Na ekranie oscylografu powstawała figura Lissajous w postaci elipsy. Odpowiednie uregulowanie fazy przy pomocy potencjometru P_0 i regulatora fazy F powodowało poziome ustawienie się elipsy, a symetryzacja elektrod hallowskich wywoływała zredukowanie elipsy do linii poziomej. Po włączeniu pola magnetycznego pojawienie się napięcia Halla przejawia się w postaci rozszerzenia tej linii poziomej z powrotem do elipsy, której szerokość w kierunku pionowym jest miarą powstającego napięcia. Przy pomiarach z komórkami kompensowano to napięcie do zera, uzyskując na ekranie oscylografu ponownie obraz w postaci linii poziomej. Wartość napięcia kompensującego, które było miarą napięcia Halla, odczytywano z dzielnika napięcia. Napięcie na wejściu trzydekadowego dzielnika wynosiło $150 \mu\text{V}$; poziom szumów aparatury, ograniczający czułość, wynosił $1,4 \mu\text{V}$.

WYNIKI POMIARÓW

Pomiary zostały przeprowadzone na 15 komórkach *Nitellopsis obtusa* przy dwóch wartościach natężenia prądu ($1,9 \mu\text{A}$ i $3,6 \mu\text{A}$) płynącego przez komórkę i przy dwóch wartościach indukcji pola magnetycznego $0,55 \text{ T}$ i $0,9 \text{ T}$. Napięcie Halla było mierzone przy dwóch przeciwnych kierunkach pola magnetycznego. W sześciu komórkach nie zaobserwowano pojawienia się efektu Halla; w dziewięciu zmierzono napięcie powstające po włączeniu pola magnetycznego. W tab. 1 przedstawiono średnie wartości napięcia Halla otrzymane dla 9 komórek *Nitellopsis obtusa*.

Tab. 1. Wyniki pomiarów napięcia Halla w komórkach *Nitellopsis obtusa*

B	0,9 T		0,55 T	
	J	J	J	J
	$1,9 \mu\text{A}$	$3,6 \mu\text{A}$	$1,9 \mu\text{A}$	$3,6 \mu\text{A}$
U_H	$5,6 \mu\text{V}$	$6,3 \mu\text{V}$	$3,6 \mu\text{V}$	$4,5 \mu\text{V}$

DYSKUSJA

Jak widać z tab. 1, uzyskane napięcia były małe, rzędu kilku μV , czyli miały wartości bardzo bliskie granicy czułości aparatury. Wyniki takie spotyka się jednak w wielu pracach dotyczących badań efektu Halla w związkach organicznych [10, 12, 25]. Uzyskanie większej dokładności pomiarów jest możliwe poprzez zwiększenie natężenia prądu, ale możliwość tę ogranicza obiekt pomiarowy. Prądy o większym natężeniu pobudzają komórki i zmieniają wartości ich parametrów elektrycznych.

Wartości napięć Halla przedstawione w tab. 1 posłużyły do wyliczenia koncentracji nośników. Próbkę do badań efektu Halla wykonywane są zwykle w kształcie prostopadłościanów, natomiast w przypadku komórek *Characeae* mamy do czynienia z próbką w kształcie rurki, ponieważ warstwa mogąca mieć przewodnictwo niejonowe przylega do powierzchni komórki. Na podstawie danych z piśmiennictwa [17] wynika, że dla komórek *Characeae*, których długość jest znacznie większa od promienia, wzór na napięcie Halla jest równie prostej postaci jak w próbce prostopadłociennej.

$$V_H = \frac{IB}{\pi r_2 n e}$$

gdzie r_2 — promień komórki.

Podstawiając do powyższego wzoru wartości: $r_2 = 0,2 \text{ mm}$, $V_H = 5 \cdot 10^{-6} \text{ V}$, $I = 2 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ i $B = 0,9 \text{ T}$ otrzymujemy wartość koncentracji nośników $n = 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Otrzymana wielkość n zupełnie dobrze zgadza się z wartościami koncentracji znajdowanymi w materiałach półprzewodnikowych [1, 13].

PIŚMIENNICTWO

1. Anselm I.: Wstęp do teorii półprzewodników. PWN, Warszawa 1967.
2. Богуславский Л. И., Ванников А. В.: Органические полупроводники и полимеры. Изд. „Наука”, Москва 1968.
3. Bulanda W.: Analiza parametrów elektrycznych komórek *Characeae* metodami elektrod zewnętrznych przy zastosowaniu prądu stałego i zmiennego (praca doktorska). Lublin 1972.
4. Dauphine T. H., Mooser E.: Rev. Sci. Instr. **26**, 660 (1955).
5. Donghue J., Eatherly W. P.: Rev. Sci. Instr. **22**, 513 (1951).
6. Epstein A., Wildi B. S.: J. Chem. Phys. **32**, 324 (1960).
7. Friedman H. L.: J. Phys. Chem. **69**, 2617 (1965).
8. Giriat W., Raułuszkiewicz J.: Hallotrony, PWN, Warszawa 1961.
9. Heilmeyer G. H., Harrison S. E.: Phys. Rev. Lett. **132**, 2010 (1969).
10. Heilmeyer G. H., Warfield G., Harrison S. E.: Phys. Rev. Lett. **8**, 309 (1962).
11. Kevane C. J., Legvold S., Spedding F. H.: Phys. Rev. **91**, 1372 (1953).

12. Kommandeur J., Hall F. R.: J. Chem. Phys. **34**, 129 (1968).
13. Kryszewski M.: Półprzewodniki wielkocząsteczkowe. PWN, Warszawa 1968.
14. Newman D. S., Schober C., Lawyer C.: J. Elektrochem. Soc. **116**, 1537 (1969).
15. Olson E. E., Wertz E.: Rev. Sci. Instr. **41**, 419 (1970).
16. Parodo A., Zedda E.: J. Sci. Instr. **8**, 748 (1969).
17. Павлов Н. И., Коньков В. Л., Кукуй А. С.: Заводская лаборатория **37**, 438 (1971).
18. Poll E. M., Sproull R. L.: Rev. Sci. Instr. **23**, 548 (1952).
19. Read P. L., Katz E.: Phys. Rev. Lett. **5**, 466 (1960).
20. Russel B. R., Wahling C.: Rev. Sci. Instr. **21**, 1028 (1950).
21. Smith G. C.: Rev. Sci. Instr. **40**, 1454 (1969).
22. Skierczyńska J., Śpiewła E., Bulanda W., Żołnierczuk R., Sielewiesiuk J.: J. Exp. Botany **24**, 47 (1973).
23. Śpiewła E., Żołnierczuk R., Skierczyńska J.: Folia Soc. Scienc. Lubl. **14**, 15 (1972).
24. Truchan E. M.: P.T.E. **4**, 198 (1965).
25. Truchan E. M.: Biofizyka **11**, 412 (1966).

РЕЗЮМЕ

Проводились измерения напряжений Холла в междоузельных клетках *Nitellopsis obtusa* и определялась концентрация переносчиков (n) в слое проводника, прилегающего к внутренней стороне клеточной мембраны. Получено: $n = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

SUMMARY

The measurements of the Hall voltage on the internodal cells of *Nitellopsis obtusa* were carried out and the concentration of the carriers (n) in the layer close to the interior side of the cell membrane was calculated. The obtained value of n was equal $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.