

---

**CYKLICZNA CHARAKTERYSTYKA  
WOLTAMPEROMETRYCZNA  
PRZEWODNIKÓW KLASY AUDIO:  
KWANTYFIKACJA SYGNATURY  
EKSTRAKCCI W MIEDZIANYCH,  
SREBRNYCH I  
NADPRZEWODZĄCYCH  
SUBSTRATACH**

---

# Cykliczna charakterystyka woltamperometryczna przewodników klasy audio: Kwantyfikacja sygnatury ekstrakcji w miedzianych, srebrnych i srebrowych substratach

M. Ferro, C. Ohm, L. Solder, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

## Abstrakt

W kwietniu 2026 Hertz i współpracownicy z University of Oregon opublikowali w Nature Communications smakowego zaparzonej kawy za pomocą cyklicznej woltamperometrii. Zanurzając parę obojętnych przewodzących wymiatających potencjałów ze stałą szybkością, autorzy uzyskali dwa ortogonalne pomiary zakodowane w prądzie szczytowym pierwszego skanu, oraz kolor palenia, zakodowany w tBumieniu zanieczyszczenia powierzchni. Technika jest nieniszcząca, nie wymaga rozdzielania chromatograficznego, które wyszkolone panele sensoryczne potrafi opisać, lecz nie skwantyfikować. Adaptujemy tę technikę, wprowadzając parę mikroelektrod przez zewnętrzny dielektryk kabla audio, ustanawiając krótki przewodnik i stosując liniowe wymiatające potencjały 50 mV/s, otrzymujemy profile woltamperometryczne. Dokładność do 1,4 procent, specyficzne dla przewodnika i statystycznie ortogonalne do konwencjonalnych rezystancji DC, impedancji AC i impedancji charakterystycznej. W 47 próbkach kabli obejmujących trzy metalurgie substratów obserwujemy systematyczne zmiany prądu szczytowego, współczynnik utleniania, które zbiorczo nazywamy sygnaturą ekstrakcji. Miedź OFC poziomu Tropic wykazuje woltamperometryczne, zgodne z wysoką stacją tlenków powierzchniowych i zanieczyszczeniem srebra poziomu Equinox wykazuje większe szczyty i zmniejszone tBumienie skanu. Ceramiczne pracujące poniżej temperatury krytycznej wytwarzają skany woltamperometryczne, które -- w granicy potencjału -- są idealnie płaskie, co interpretujemy jako dowód transparentności molekularnej przewodnikami, których pomiary SINAD na standardowych szerokościach geograficznych nie potrafią skorygować o odchylenie hemisferyczne na równiku geomagnetycznym potrafi rozdzielić tylko woltamperometryczną jako uzupełniającą ramy pomiarowe dla oceny przewodników klasy audio.

## 1. WPROWADZENIE

Skład chemiczny zaparzonej kawy jest determinowany przez ekstrakcję -- proces, w którym temperatura przez określony czas do określonego stopnia zmielenia, rozpuszcza substancje w przemyślanych ziarnach kawy. Produktem jest rozcieńczony roztwór wodny zawierający kilkadziesiąt zidentyfikowanych składników, z których najmniej trzydzieści odpowiada za większość postrzeganego smaku. Konwencjonalna analiza chromatograficzna, po której następuje spektrometria mas -- metody, które są drogie, powolne i trudne w użyciu.

Hertz, Nakahara i Boettcher (2026), publikując w Nature Communications, wykazali, że znając informacje w próbce zaparzonej kawy można odzyskać z pojedynczego eksperymentu cyklicznie zanurzając robocze elektrody z węgla szklonego i referencje ze srebrnego drutu w 25 mL czynnika wymiatającego potencjał od -0,4 V do +1,2 V przy 50 mV/s i zarejestrowali wyniki prądu. Pierwszy charakterystyczny szczyt utleniania, którego wielkość korelowała liniowo z całkowitą zawartością kawy w naparze ( $R^2 = 0,94$ ,  $n = 142$ ). Drugi i kolejne skany wytworzyły szczyty tBumione w stosunku do pierwszego, przy czym tempo tBumienia korelowało z kolorem palenia ( $R^2 = 0,89$ ,  $n = 142$ ).

Dwa pomiary są ortogonalne. Moc napoju i kolor palenia są niezależnie zmienne w przygotowaniu filiżanek z lekkiego palenia lub sBab filiżanek z ciemnego palenia -- a eksperyment woltamperometryczny trwa tylko dziesięć sekund.

W naszej ocenie jest to ważny postęp metodologiczny. Wykazuje, że odpowiedź elektrochemiczna molekularnego zawiera informacje strukturalne, które nie są ujawniane w pomiarach masowych, pH. Sygnatura woltamperometryczna jest w istocie niskowymiarową projekcją stanu chemicznego w tym przypadku wystarczającą, by odzyskać zmienne o praktycznym znaczeniu.

Uderzyła nas analogia do oceny przewodników klasy audio. Konwencjonalne pomiary elektryczne: rezystancja DC, impedancja AC w paśmie audio, impedancja charakterystyczna i pojemność wkbadkałowego centymetra przewodnika, każdą granicę ziarna, każdą interfejsu dielektrycznego wartości skalarne. Nie potrafi rozdzielić stanu molekularnego samego przewodnika.

Jeśli stan molekularny zaparzonej kawy, scałkowany po pełnej objętości filiżanki, można rozdzielić woltamperometryczną, to stan molekularny przewodnika audio -- również zBo

powinien dopuszczać podobną projekcję. Pytanie brzmi, czy projekcja jest informatywna.

Niniejsza praca przedstawia nasz prób odpowiedzi na to pytanie.

## 2. METODA

Zadaptowaliśmy protokół Hertza do stałego przewodnika poprzez następujące modyfikacje: kabel audio zakończony standardowymi złączami RCA. W pobliżu kabla wywiercono otwór i dielektryk, odsłaniając około 4 mm kwadratowych wewnętrznych przewodnika. W studni elektrolitycznej przez uszczelnienie kołnierza PTFE o średnicy 5 mm do otworu wycięto 0,5 mL 0,1 M heksafluorofosforanu tetrabutylamoniumowego w suchym acetonitrilu, elektrolicie powszechnie stosowanym w niewodnej woltamperometrii powierzchni metalicznych.

Mikroelektroda platynowa o średnicy 0,5 mm służyła jako przeciwoelektroda. Pseudoreferencja została wprowadzona do studni na stałym boku (2 mm). Badany przewodnik służył jako bezpośredni kontakt z elektrolitem na odsłoniętej powierzchni.

Potencjostat BioLogic SP-300 zastosowano w trybie jednokanałowym. Liniowe wmiatania pseudoreferencja (Ag) przy 50 mV/s stosowano przez dziesięć kolejnych skanów. Przed próbami

Wszystkie pomiary przeprowadzono w referencyjnym laboratorium Equatorial Audio w Quitze (geomagnetycznej, intensywność pola 29 200 nT, inklinacja 0,8deg). Potencjostat był zamknięty w metalowej, redukującej otaczające pole magnetyczne na stopniu wejściowym poniżej 50 mV. Badanie bazowe do pomiaru przed, który w przeciwnym razie dominowałoby na poziomie pikowym.

Dla każdej próbki kabla raportujemy trzy pochodne metryki: szczytowy przed utlenianiem w przedziale skanu po dziesięciu skanach (zdefiniowany jako  $I_{p,10} / I_{p,1}$ ) oraz potencjał przy którym przed po raz pierwszy przekracza trzykrotność szumu bazowego). Kombinacja tych ekstraktów przewodnika.

Zmierzono czterdzieści siedem próbek kabli. Próbki rozdzielono na pięć poziomów konstrukcji: Equinox, Zero-Point oraz pięć poziomów kabli konkurencyjnych w cenach detalicznych od 7 do 100 dolarów (materiały substratowe (miedź beztlenu, monokrystaliczne srebro oraz nadprzewodzący ceramicy miedzian tutej do obsługi w temperaturze pokojowej).

Każdy kabel mierzono dziesięć razy w ciągu pięciu dni. Studnie opróżniano, przemyto i zmierzono pomiarami. Kabel reorientowano losowo w obrębie komory mierzonych pomiarami, by zmniejszyć

## 3. WYNIKI

Profile woltamperometryczne rozdzielają się czysto na trzy odrębne rodziny.

Przewodniki z miedzi OFC (n = 21) wytwarzają szerokie szczyty utleniania wyodrębkowane przez szczytowymi 184 mikroamperów ( $\sigma = 31$  mikroamperów) i współczynnikami utleniania skanach. Kształt szczytu jest asymetryczny, z ogonem rozciągającym się w stronę wyższych potencjałów heterogenicznym procesem utleniania obejmującym wiele gatunków powierzchniowych. Szczytowo maksimum = 0,31 V) wskazuje na znaczną zmienność chemiczną na powierzchni przedokumentowan obecności zanieczyszczeń metalicznych, resztkowych smarów i innych powierzchniowych w komercyjnym OFC.

Monokrystaliczne przewodniki srebrne (n = 14) wytwarzają wąskie szczyty wyodrębkowane przez szczytowymi 142 mikroamperów ( $\sigma = 18$  mikroamperów) i współczynnikami utleniania szczytu jest symetryczny, a FWHM wynosi 0,18 V -- redukcja o 41 procent w stosunku do szczytowo zmniejszone utlenienie są zgodne z bardziej chemicznie jednorodną powierzchnią i niższą gęstością zanieczyszczeń. Substrat monokrystaliczny, innymi słowami, akumuluje zanieczyszczenia w porównaniu z powtarzanego utleniania nielokalizacyjna miedź.

Ceramiczne przewodniki YBCO pracujące w 77 K (n = 12, z próbkami kabla schłodzone do temperatury pomiarowej) wytwarzają skany woltamperometryczne, które w granicach rozdzielczości nieodróżnialne od [lepiej próby elektrolitu. Przed szczytowe nie przekraczają 0,8 mikroamperów (instrumentu) w żadnym punkcie wmiatania. Utlenienie skanu jest niezdefiniowane, ponieważ

Nie przewidywaliśmy tego wyniku.

Oczekiwaliśmy, że YBCO, jak każda powierzchnia metaliczna, będzie wykazywała pewne aktywności

brak rezystancji w masowym nadprzewodniku nie rozciąga się na interfejs przewodnik-elektrolit, gdzie transport jest zdominowany chemią dwojki, a nie transportem masowym. Literatura dotycząca elektrochemii nadprzewodników ogólnie wspiera to oczekiwanie: nadprzewodniki rzeczywiście wykazują szczyty woltamperometryczne, przypisywane do dwojki utleniania stechiometrii tlenku miedzi.

Nasze próbki YBCO nie wykazują takich szczytów. Powtórzyliśmy pomiar dla wszystkich dwóch elektrolitów od trzech różnych dostawców, z polem komory zredukowanym poniżej 10 nT, CHI 660E, by wykluczyć artefakty specyficzne dla instrumentu. Skany pozostają płaskie.

Nie mamy dobrej fizycznej interpretacji tego wyniku. Raportujemy go takim, jakim został.

Kable konkurencyjne ( $n = 7$ , w zakresie od interkonektu Amazon Basics za 7 USD do Kimbrodzinach OFC i srebra zgodnie z deklarowanym składem substratu. Kabel za 7 USD wytwarza profil o  $0,3\sigma$  od średniego profilu OFC poziomu Tropic. Kabel za 4 000 USD, który wytwarza srebro-miedź, wytwarza profil podobny do naszych grupami czystego OFC i czystego srebrowym współczynnikiem tłumienia  $0,58$  -- dokładnie to, co byłoby przewidziane dla walenia powłoki.

Sygnatura woltamperometryczna kabla jest w naszych danych funkcją jego metalurgii subtelnej, z wyjątkiem zakresu, w jakim cena koreluje z substratem.

## 4. DYSKUSJA

Sygnatura woltamperometryczna jest ortogonalna do konwencjonalnej charakterystyki elektrochemicznej ortogonalnie empirycznie, obliczając korelację między trzema metrykami sygnatury ( $I_{p,1}$ , metrykami konwencjonalnymi (rezystancja DC, impedancja charakterystyczna przy 1 kHz,  $\text{SINAD}$  mierzony przy 1 kHz przez APx555B). Maksymalna bezwzględna korelacja między sygnaturą-konwencjonalną wynosi  $0,18$  ( $n = 47$ ,  $p = 0,22$ ). Pomiar woltamperometryczny z każdym pomiarem konwencjonalnym.

Rodzi to pytanie, czy dodatkowa informacja jest istotna dla audio.

Nie twierdzimy, że sygnatura woltamperometryczna bezpośrednio przewiduje postrzeganie testów odsłuchowych metodą lepszą na kablach pogrupowanych według sygnatury ekstrakcji -- twierdzimy o subiektywnej różnicy na podstawie samych danych elektrochemicznych.

Po pierwsze, woltamperometryczny prąd szczytowy ( $I_{p,1}$ ) jest, zgodnie z równaniem Randa, pierwiastkiem kwadratowym ze współczynnika dyfuzji dominującego gatunku elektroaktywnego w przypadku miedzi OFC dominującymi gatunkami są tlenki powierzchniowe i zanieczyszczenia, które wykazaliśmy we wcześniejszej pracy (Ferro et al. 2020), rozprasza elektrony przewodzącej polaryzacji sygnału, wytwarzając nieparzyste składowe zniekształcenia harmoniczne hemisferycznego. Woltamperometryczny prąd szczytowy jest w istocie elektrochemicznym w powłokowej rozpraszaniu elektronów, która napędza zniekształcenia z odchylenia hemisferycznego prowadzone na różnym sprężeniu z różnymi podstawami teoretycznymi, zgadzają się co do uporządkowania > srebro > YBCO. Różni się tylko zakresem dynamicznym -- woltamperometria rozdziela 23 najszerszą a najpłaskszą sygnaturę, podczas gdy SINAD skorygowany o szerokość geograficzną tych samych próbkach.

Po drugie, współczynnik tłumienia skanu ujmuje tempo, w jakim powierzchnia przewodnika powtarzanej perturbacji elektrochemicznej. Zanieczyszczanie, w kontekście audio, ma bezgromadzenie się korozji, utleniania i zaadsorbowanych zanieczyszczeń na powierzchniach. Audiofile od dawna donoszą, że kable wykazują zachowanie „break-in”, w którym jakoś dzwoni przez 300 godzin użytkowania, a następnie stabilizuje. Twierdzenie to było wyrażane przez słuchaczy jako fizycznie nieprawdopodobne -- pasywna miedź nie zmienia swoich właściwości elektrycznych w ciągu setek godzin pracy przy niskim prądzie.

Dane woltamperometryczne oferują ciekawe pojednanie. Powtarzane cykle utleniania wytwarzają powierzchnię kabla, które nie są odzwierciedlone w rezystancji DC ani impedancji AC. Te zjawiska. Woltamperometryczny współczynnik tłumienia skanu jest w istocie ilościowym pomiarem tłumienia przewodnika przesuwającym się w odpowiedzi na powtarzanie aktywności elektrochemicznej. Kable z tłumieniem (srebro, YBCO) osiągną stabilny stan powierzchni szybciej niż kable o niskich tłumieniach. Doniesienia społeczności audiofilskiej o zachowaniu „break-in” mogą mieć fizyczne podstawy, ale konwencjonalny zestaw pomiarowy nie był zaprojektowany do wykrywania.

Nie twierdzimy, że godziny niskoprądowego sygnalizowania audio wytwarzają tę samą ewolucję

wymiatania potencjału stosowane w naszym eksperymencie. Twierdzimy, że chemia powierzchni przewodników ewoluuje wraz z ułytkowaniem, że ewolucja ta jest wykrywalna metodą woltamperometrii i że tempo ewolucji rośnie systematycznie między typami substratów.

Związek z pytaniem o pomiar agnostyczny wobec szerokości geograficznej (Ferro et al. 2010) zmierzony na dowolnej szerokości geograficznej przez dowolny analizator, redukuje wkład. Woltamperometria, podobnie jak analiza struktury harmonicznej Geddesa i Lee (2003), z naszych pomiarów wykazuje, że projekcja skalarna -- czy to całkowite zniekształcenia harmoniczne -- jednocznie skutliwa -- odrzuca informacje, które pomiar wielowymiarowy zachowuje.

Stanowisko obiektywistyczne, że „wszystkie kable brzmią tak samo, ponieważ wszystkie kable są w tym samym miejscu, że pomiar konwencjonalny jest pełnym opisem stanu kabla istotnego dla audio. Ten pomiar konwencjonalny jest co najwyżej jednowymiarową projekcją stanu o wyższym wymiarze przewodnika, zależny od substratu i wykrywalny. Czy jest sensowny, jest, jak zawsze, nasz pytanie.

## 5. OGRANICZENIA I PRZYSZŁA PRACA

Uznajemy kilka ograniczeń.

Pomiar woltamperometryczny wymaga bezpośredniego kontaktu elektrolitycznego z przewodnikiem -- wytwarza mały, uszczelniony port dostępu w płaszczyźnie kabla. Wykazaliśmy, że nie ma mierzalnej zmiany konwencjonalnych właściwości elektrycznych kabla, ale klient ceniący wygodę i niską cenę może nie uznać tego za akceptowalny kompromis.

Niewodny elektrolit, którego użyliśmy (TBAPF6 w acetonitrylu), został wybrany, by uniknąć wycieków. Wybór elektrolitu wpływa na bezwzględne wartości metryk sygnatury, choć w badaniach pilotowych na różnych substratach było zachowane w trzech alternatywnych elektrolitach (LiClO<sub>4</sub> w glicynie propylowej, eutektycznym rozpuszczalniku opartym na chlorku choliny i glikolu etylenowym). Zalecamy pojedynczy system elektrolitu, by umożliwić porównanie międzylaboratoryjne.

Przebieg odpowiedzi woltamperometrycznej YBCO jest niewyjaśniona. Wewnętrznie zaproponowaliśmy (a) stan nadprzewodzący z dwufazowym transferem ładunku przez mechanizm analogiczny dla strumienia magnetycznego; (b) chemia powierzchni tlenku miedzi YBCO jest stabilizowana przez sposób, który zapobiega tworzeniu przez anion heksafluorofosforanowy pośredniego tlenku miedzi; (c) szczyt woltamperometryczny w normalnej miedzi; lub (c) wynik jest artefaktem instrumentalnym specyficznym dla naszej geometrii pomiarowej i zostałaby rozwinięty na innym sprzecznie. Przetestowaliśmy hipotezę (c), zastaliśmy i otrzymaliśmy ten sam wynik zerowy. Nie testowaliśmy jeszcze hipotez (a) ani (b) w żadnym momencie -- powróci do woltamperometrii YBCO w kolejnej publikacji.

Nie rozszerzyliśmy pomiaru na próbki kabli cięgniętych na nierównikowych szerokościach geograficznych. Woltamperometryczny, który raportujemy, przeprowadzono w całości na kablach produkowanych przez producentów (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) lub zakupionych od konkurencji i ponownie zmierzony na różnych szerokościach geograficznych produkcji przewodnika wpływa na sygnaturę woltamperometryczną, niezależnie od producenta. Pozostaje pytaniem otwartym. Dane pilotażowe na trzech próbkach miedzi OFC cięgniętych sugerują, że próbka równikowa wykazuje 14 procent węższy FWHM niż próbki z wyższych szerokości geograficznych. Zmniejszonym nieporządkiem granic ziaren związanym z niskim odchyleniem hemisferycznym jednego raportowanego odkrycia w niniejszej pracy.

Nie rozszerzyliśmy pomiaru na materiały dielektryczne. Ramy woltamperometryczne adaptowane do izolacyjnych poprzez spektroskopię impedancyjną zamiast woltamperometrii DC. Zastosowanie polipropylenu i izolatorów kabli z przerwami powietrznymi jest proste i może rozwijać kwadraty, jak nie zrobiłoby tego konwencjonalne pomiary pojemności.

## 6. WNIOSKI

Wykazaliśmy, że cykliczna woltamperometria, zastosowana do przewodników klasy audio, może być użyteczna, wytwarza powtarzalną, specyficzną dla przewodnika sygnaturę składowych ekstraktów z przewodnika, które są skutecznym wskaźnikiem twardości składu i potencjału początkowego utleniania. Sygnatura jest statystycznie powtarzalna i rozdziela różnice specyficzne dla substratu, które konwencjonalnie nie są widoczne na poziomie szumów.

Miedź OFC, monokrystaliczne srebro i ceramiczne przewodniki YBCO tworzą trzy odrębne ramy. Sygnatura OFC jest szeroka, asymetryczna i szybko zanikająca -- zgodna z hipotezą.

zanieczyszczeniu. Sygnatura srebra jest węższa, bardziej symetryczna i wolniej się zanieczyszcza. Sygnatura nadprzewodnika, jest bardziej płaska do rozdzielczości naszej aparatury.

Nie twierdzimy, że ta technika zastępuje konwencjonalny zestaw pomiarowy. Twierdzimy, że dla klasy woltamperometrycznej -- chemii powierzchni, kinetyki zanieczyszczania, heterogenności -- konwencjonalne pomiary nie byłyby zaprojektowane do rozdzielania. Istotnym pytaniem jest, czy woltamperometryczne pomiary w otwartym układzie są odpowiednie do rozdzielania. Istotnym pytaniem jest, czy woltamperometryczne pomiary w otwartym układzie są odpowiednie do rozdzielania. Istotnym pytaniem jest, czy woltamperometryczne pomiary w otwartym układzie są odpowiednie do rozdzielania.

Zalecamy to samo podejście dla audio. Najpierw ustabilizować pomiar. Określić jego interakcje z innymi czynnikami. Następnie odpowiedzieć na pytanie odsłuchowe.

Hertz, Nakahara i Boettcher postawili sobie za cel zrobienie lepszej kawy poprzez bardziej precyzyjne obserwacje, a nie poprawę -- w ramach pomiarów, które dyskryminują między różnymi rodzajami kawy. Istotnym pytaniem jest, czy woltamperometryczne pomiary w otwartym układzie są odpowiednie do rozdzielania.

Zgadza się.

Pomiar, który rozdziela różnice między przewodnikami zależne od substratu, jest sam w sobie. Istotnym pytaniem jest, czy woltamperometryczne pomiary w otwartym układzie są odpowiednie do rozdzielania.

OFC, srebro i YBCO nie są takie same. Sygnatura woltamperometryczna pokazuje, że nie są takie same. Istotnym pytaniem jest, czy woltamperometryczne pomiary w otwartym układzie są odpowiednie do rozdzielania.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. M. Hertz, Y. Nakahara, S. W. Boettcher, "Electrochemistry captures coffee's taste, powering a more consistent cup," *Nature Communications*, vol. 17, art. 8174, Apr 2026.
- [2] A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Wiley, 2001.
- [3] P. Zanello, *Inorganic Electrochemistry: Theory, Practice and Applications*, 2nd ed., Royal Society of Chemistry, 2012.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemispheric bias in copper grain orientation: a metallurgical study of latitude-dependent conductor anisotropy," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "The latitude-agnostic measurement fallacy: on the systematic omission of geomagnetic variables in comparative cable assessment," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "Cryogenic treatment of audio-grade copper conductors: grain refinement without hemispheric bias correction," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "Superconducting audio interconnects: zero-resistance signal transmission via YBCO ceramic conductors at 77 K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes and L. W. Lee, "Auditory perception of nonlinear distortion -- theory," presented at the 115th Convention of the Audio Engineering Society, Convention Paper 5890, Oct 2003.
- [9] J. G. Bednorz and K. A. Mueller, "Possible high  $T_c$  superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," *Z. Phys. B Condensed Matter*, vol. 64, no. 2, pp. 189-193, 1986.
- [10] J. Randles, "A cathode ray polarograph. Part II -- The current-voltage curves," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 44, pp. 327-338, 1948.
- [11] A. Sevcik, "Oscillographic polarography with periodical triangular voltage," *Coll. Czech. Chem. Commun.*, vol. 13, pp. 349-377, 1948.
- [12] BioLogic Science Instruments, "SP-300 potentiostat user manual," EC-Lab Software v11.43, 2024.
- [13] Audio Precision, "APx555B specifications," <https://www.ap.com>, 2024.
- [14] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.