

Publikacje braci Curie o piezoelektryczności

Francis A. Duck

Historia ultradźwięków bierze swój początek od odkrycia przez braci Curie, Jacquesa i Pierre'a, dokonanego we wczesnych latach 80. XIX w., a dotyczącego właściwości piezoelektrycznych niektórych kryształów. Oryginalne dokumenty zostały napisane w języku francuskim, a ich tłumaczenie na język angielski jest trudno dostępne. Celem niniejszego artykułu jest udostępnienie tłumaczeń dwóch najważniejszych prac braci Curie, które zostały opublikowane w Comptes rendus de l'Académie des sciences i które położyły fundamenty pod późniejsze wykorzystanie i eksploatację kwarcu, jako pierwszego praktycznego przetwornika do wykrywania ultradźwiękowych echo-impulsów.

The Curie papers on piezoelectricity

The history of ultrasound commonly traces its origins to the discovery by the Curie brothers, Jacques and Pierre, in the early 1880s, of the piezoelectric properties of certain crystals. Whilst commonly cited, the original papers, written in French, are difficult to find in English translation. The purpose of this article is to make available translations of two of the Curies' most important papers, published in Comptes rendus de l'Académie des sciences, which laid the foundation for the subsequent use and exploitation of quartz as the first practical transducer for ultrasonic pulse-echo detection.

Słowa kluczowe: piezoelektryczność, piroelektryczność, ultradźwięki, Pierre Curie, Jacques Curie, Paul Desains, Charles Friedel, maszyna Holtza, ćwiartkowy elektrometr Thompsona-Mascarta

Key words: piezoelectricity, pyroelectricity, ultrasound, Pierre Curie, Jacques Curie, Paul Desains, Charles Friedel, Holtz machine, Thompson-Mascart quadrant electrometer

Wstęp

Życie Pierre'a Curie (1859-1906) jest lepiej udokumentowane niż jego starszego brata, Jacquesa (1856-1941) [1, 2]. W czasie, gdy w 1880 r. ukazały się ich pierwsze raporty dotyczące piezoelektryczności i odwrotnego efektu piezoelektrycznego, obydwoj byli 20-latkami. Byli ze sobą blisko związani (Ryc. 1), razem w pracy i w domu, często spacerowali wzdłuż Sieny w Dreveil, zwłaszcza w trakcie świąt.

Jacques-Paul, starszy od Pierre'a o 4 lata, był asystentem laboratoryjnym (*preparator*) Charlesa Friedela (1832-1899) w Laboratorium Mineralogii na Sorbonie, z kolei Pierre został w 1878 r. asystentem laboratoryjnym Paula Desainsa (1817-1885) w Laboratorium Fizyki na Sorbonie. Friedel został pierwotnie zatrudniony na Sorbonie przez Charlesa-Adolphe'a Wurtza (1817-1884) jako chemik organiczny i tylko na chwilę objął stanowisko kierownicze w dziale mineralogii w 1876 r., krótko przed przyjęciem Jacquesa. Nazwisko Friedela jest znane dzięki

jego metodzie syntezy homologów benzenu, zwanej reakcją Friedela-Craftsa.

Badania nad piezoelektrycznością rozpoczęły się w trakcie studiowania przez Jacquesa Curie piroelektryczności pod kierunkiem Friedla. Maria Curie określiła te badania w biografii jej męża jako „bez cienia szansy na odkrycie”. Dalej pisze: „intensywna praca myślowa na temat symetrii krystalicznej pozwoliła braciom przewidzieć możliwości takiej polaryzacji piroelektrycznych tych samych kryształów”.

Pierwszy dokument [5] (przetłumaczony w całości jako Załącznik A) zawiera raport, który informuje, że elektryczność biegunowa została wygenerowana poprzez ściskanie kilku znanych kryształów piroelektrycznych, których powierzchnie zostały przycięte prostopadle do osi elektrycznej (hemiedrycznej). Ładunek elektryczny zmierzono elektrometrem Thompsona-Mascarta (Ryc. 2), projekt ćwiartkowego elektrometru z uwzględnieniem kilku zmian Eleuthère Mascart (1837-1908), francuskiego fizyka, które zwiększyły jego precyzję i czułość. Zaobserwowano, że kompresja pod względem biegunowości była równa chłodzeniu: dekompresja - ogrzewaniu, odnosząc się bezpośrednio do obserwacji znanych zachowań piroelektrycznych tych samych kryształów.

We wszystkich siedmiu notatkach, które ukazały się w *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, pojawiają



Ryc. 1. Jacques Curie (po lewej) i Pierre Curie (po prawej) – kiedy byli 20-latkami

się raporty odnośnie ich prac nad piezoelektrycznością [5-11], dwie w 1880 r., cztery w 1881 r. i ostatnia w 1882 r. Notatki zostały przedstawione przez kierowników katedr, w których bracia pracowali: cztery przez Charlesa Friedela, kierownika katedry mineralogii oraz trzy przez Paula Desainsa, kierownika katedry fizyki. W końcu opublikowano kompletną dokumentację, podsumowującą całość

ich odkryć [12], podkreślając w ten sposób koniec niezmiernie kreatywnego okresu odkryć naukowych.

Druga notatka [6] nawiązywała do pierwszej, opisując zachowanie wszystkich badanych kryształów, niezależnie od struktury, by wreszcie stwierdzić: „słowami laika, że najbardziej wysunięty (spiczasty) koniec hemiedrycznej formy odpowiada dodatniemu biegunowi w trakcie kontrakcji, podczas gdy tępy koniec odpowiada ujemnemu biegunowi w trakcie kontrakcji”. Następnie, w ich pierwszej publikacji w 1881 r., przedstawili raport dotyczący pięciu sformułowanych przez nich praw uwalniania elektryczności poprzez ciśnienie w turmalinie [7].

- I Dwa końce kryształu turmalinu uwalniają ilości elektryczności, które są równe i przeciwnego znaku.
- II Ilość uwolniona przez określony wzrost ciśnienia jest przeciwnego znaku oraz równa wielkości do tej wyprodukowanej przez równoważną redukcję siły.
- III Ilość jest proporcjonalna do zmiany siły.
- IV Jest niezależna od długości kryształu turmalinu.
- V Dla tej samej zmiany siły na jednostkę powierzchni, ilość jest proporcjonalna do tej powierzchni. ■

Na podstawie powyższych praw, powstała kolejna notatka [8], przedstawiająca zastosowanie fenomenu piezoelektryczności do realizacji kilku naukowych celów: {a} jako standardowe źródło elektryczności; {b} jako sposób do mierzenia pojemności elektrycznej oraz, {c} w szczególności, jako najbardziej dokładny sposób pomiaru ładunku. Ten ostatni sposób został wykorzystany w „kwarcowym piézo-électrique” (Ryc. 3), [13]. urządzeniu przy pomocy którego Maria Curie określiła ilość promieniowania radioaktywnego radu.

Podążając za treścią kolejnej notatki opisującej model piezoelektryczności, jako krystalicznej baterii [9], dochodzi się do dwóch najprawdopodobniej najistotniejszych dodatków do tekstu, które opisują odwrotny efekt



Ryc. 2. Ćwiartkowy elektrometr Thompsona-Mascarta wykorzystany przez Jacquesa i Pierre'a Curie do pomiaru piezoelektrycznego ładunku, powstałego na powierzchniach licznych hemiedrycznych kryształów w 1880 r. {Pobrane z www.uniurb.it/Phylslab/strumenti/e24/html}

■ Słowo *pression* zostało przetłumaczone jako siła, tak, aby sens V prawa był spójny.



Ryc. 3. Diagram kwarcu piézo-électrique [13] wykorzystany później przez Marię i Pierre'a Curie do pomiaru radioaktywności radu. Końce kryształu są przytrzymywane przez metalowe mocowania H i B, z hakami pozwalającymi na stosowanie tacki i obciążników. Oś optyczna a-b, c-d jest pozioma, tak więc siła rozciągająca działa w kierunku prostopadłym do obu osi: optycznej i elektrycznej. Linie (mm i $m'n'$) są narysowane na posrebrzeniu dwóch powierzchni, aby odizolować elektrycznie srebrną powłokę, a ładunek jest zbierany poprzez użycie dwóch miedzianych źródeł rr

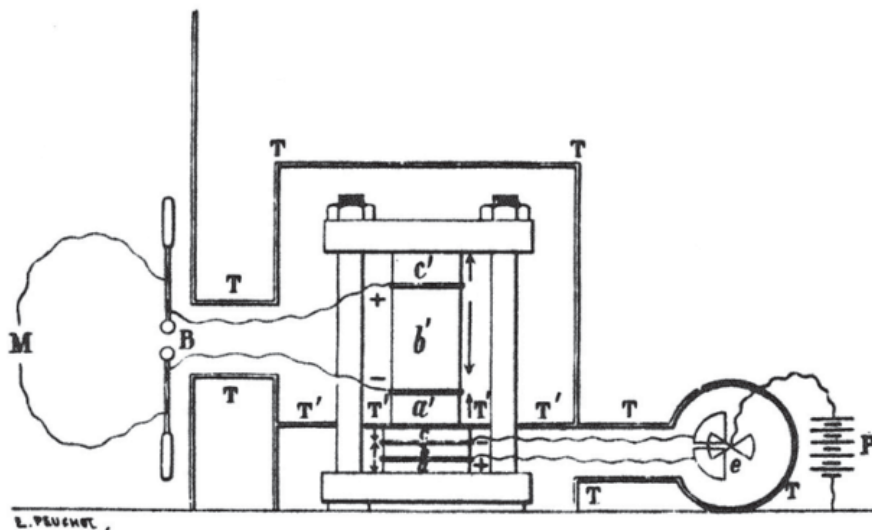
piezoelektryczny w kwarcu i turmalinie. Pierwszy [10] został przedstawiony w tłumaczeniu w Załączniku B.

Aparaturę przedstawiono na Rycinie 4. Została ona przygotowana tak, aby co minutę wykrywać napięcia, które Gabriel Lippmann (1845-1921) przewidział na podstawie zachowania elektryczności. Kwarcowe płyty były umocowane pomiędzy dwoma ciężkimi płytami z brązu. System wykrywania napięcia składał się z trzech cienkich taśm kwarcowych, oddzielonych przez elektrody połączone z elektrometrem. Kompresja była dokonywana przy użyciu drugiego trypletu kryształów, oddzielonych miedzianymi dyskami, przy czym orientacja środkowego kryształu była odwrócona, tak że dodatnie i ujemne płaszczyzny były wspólne. Zewnętrzne powierzchnie były uziemione, a miedziane dyski połączone do maszyny Holtza, aby generować wysoki potencjał (Ryc. 5).

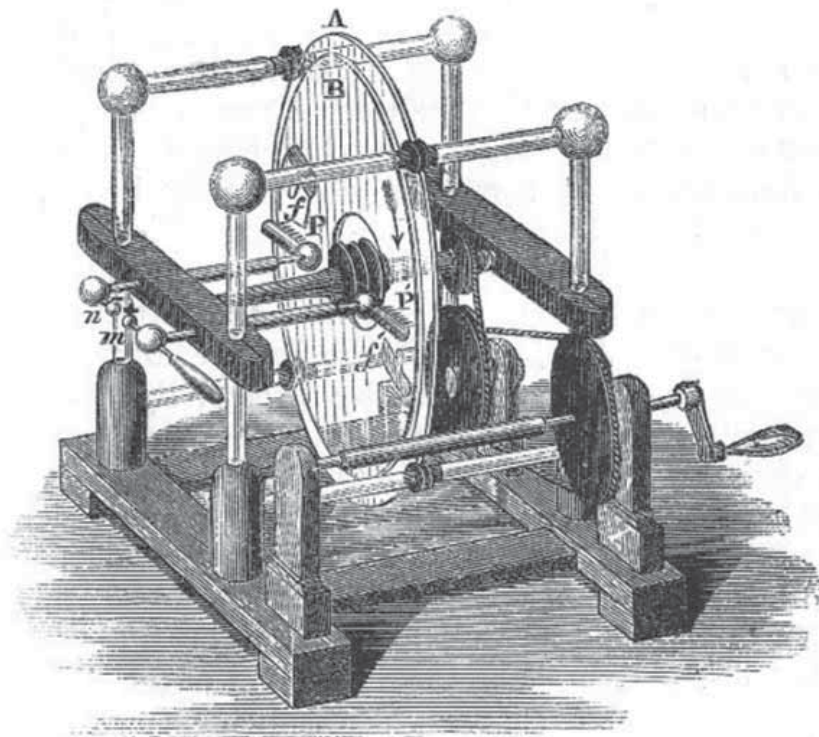
Dylatacja lub kontrakcja górnego układu generowała ładunek na dolnych taśmach kwarcowych, który był mierzony elektrometrem. W dodatkowym dokumencie [11], bracia przedstawili szczegółowe wyniki pomiarów rozszerzania kryształu, spowodowanego przez efekt odwrotnej piezoelektryczności, używając do tego układu dźwigni pokazanego na Rycinie 6, a opisanego poniżej.

„Płytką kwarcową, pokrytą dwoma cynfoliami na powierzchniach prostopadłych do osi elektrycznej (bardzo cienkimi w kierunku tej osi), była przytwierdzona na jednym z końców do solidnego mocowania. Drugi koniec, zamocowany przy pomocy małej, sztywnej części, przytrzymywał mniejsze ramię lewara. Z kolei większe ramię przytrzymywało małą, przypominającą pajęczynę siatkę, która była obserwowana pod mikroskopem wyposażonym w mikrometr optyczny”.

„Różnice w długości kwarcowej płytki były wzmocnione 50-krotnie. Napięcie elektryczne, ładujące dwie cynfolie, generowano przy użyciu maszyny Holtza, podłączonej do baterii z sześciu butelek lejdejskich. W ten sposób napięcie było ustanawiane raczej wolno, a prze-



Ryc. 4. Diagram pokazujący sprzęt używany przez Jacquesa i Pierre'a Curie w celu zademonstrowania efektu odwrotnej piezoelektryczności w turmalinie i kryształach kwarcu w 1881 r. [14]. Maszyna Holtza M dostarcza napięcie, kontrolowane przez iskiernik B . Napięcie jest dostarczane do grubego trypletu kwarcu abc , które kurczy cieńszy tryplet kwarcu $a'b'c'$. Ładunek jest wykryty poprzez użycie ćwiartkowego elektrometru e , podłączonego do baterii P . Cała aparatura jest otoczona przez uziemioną osłonę cynową T



Ryc. 5. Maszyna Holtza

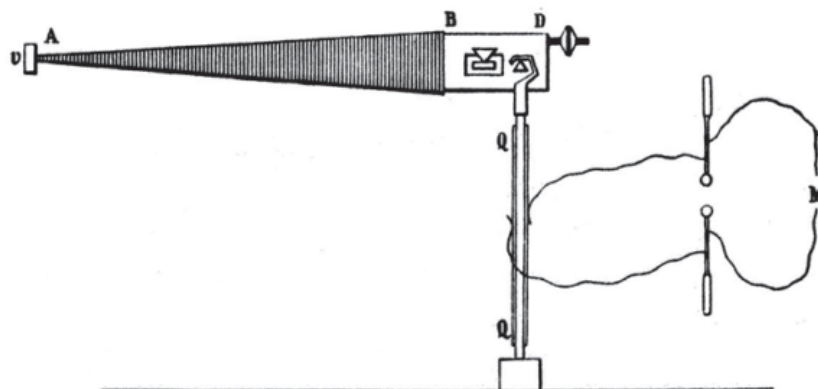
mieszczenia dźwigni odnotowywano natychmiastowymi iskrami wyładowań pomiędzy dwoma kulami.”

W dwóch eksperymentach, wykorzystując różne kryształy (o grubościach 2,4 mm oraz 0,65 mm), zmierzili w jednym przypadku rozszerzalność na poziomie 0,00061 mm, w porównaniu z przewidywaną wartością 0,00058 mm oraz w drugim wartość 0,00050 mm do przewidywanej 0,00048 mm. W jednym przypadku musieli zwiększyć przerwę iskrową do 6 mm, w celu osiągnięcia odpowiednio wysokiego napięcia, aby pomiary były wystarczająco dokładne.

Cała praca była trudna i wymagająca, więc Desains udostępnił braciom oddzielne pomieszczenie, przyległe do laboratorium fizyki, by mogli przeprowadzać te wyrafinowane eksperymenty. Opisy ich pracy z miejsca przenoszą czytelnika do tego małego pomieszczenia

na Wydziale Fizyki na Sorbonie i odtwarzają wyzwania i ekscytację towarzyszącą młodym braciom, którzy jako pierwsi bezpośrednio zaobserwowali efekty piezoelektryczności.

W 1883 r. Jacques wyprowadził się z Paryża, aby zostać Maître de Conference (starszym wykładowcą) mineralogii na Uniwersytecie Montpellier. Pierre przeniósł się w 1882 r. do nowo otwartego École Municipale de Physique et Chimie na stanowisko dyrektora laboratorium. W 1884 r., po śmierci Wurtza, Friedel przeniósł się na stanowisko profesora chemii organicznej. Pomimo to, w dalszym ciągu aktywnie interesował się mineralogią. Znacznie później, w roku swojej śmierci w 1899 r., razem z francuskim inżynierem górnictwa Eduardem Cumenge (1828-1902), odkrył karnotyt (minerał z gromady uranylu) w kopalni Rajah, w hrabstwie Montrose w Kolorado.



Ryc. 6. Doświadczenie, w którym Jacques i Pierre Curie dokładnie zmierzili rozszerzanie kwarcu w efekcie odwrotnej piezoelektryczności [14]. Płytkę kwarcu Q jest spięta w jej dolnym końcu i połączona z krótkim końcem dźwigni DBA . Przemieszczenie siatki v jest mierzone za pomocą optycznego mikrometru. Butelki lejdejskie połączone z maszyną Holtza (nie pokazane) pozwalają na zwiększenie w kontrolowanych warunkach napięcia do maksymalnego, określonego przez rozładowanie w przerwie iskrowej

Odkrycie to zapoczątkowało wydobycie uranu i powstanie komercyjnego przemysłu radowego w Stanach Zjednoczonych [3, 4].

Paul Desains, który ukazuje się w niniejszej opowieści, jako dojrzały przewodnik przez wszystkie badania, zmarł w 1885 r. w wieku 68 lat. Nie umniejszając w żaden sposób geniuszu braci Curie, wpływ Desainsa nigdy nie został doceniony. Prawie 15 lat starszy od Friedla, stworzył w Paryżu w 1869 r. pierwsze, przeznaczone do nauczania laboratorium fizyki, udostępniając w ten sposób dobrze wyposażony obiekt do przeprowadzania eksperymentów przez braci Curie. Mianował utalentowanego lecz introspektywnego Pierre'a asystentem, kiedy ten miał zaledwie 19 lat oraz nadzorował jego pierwszą naukową pracę, określając długość fal promieniowania podczerwonego, zagadnienia, na którym Desains oparł własną karierę. Dał wolną rękę Pierre'owi, by pracował z Jacques'em w laboratorium Friedla, a następnie udostępnił specjalne pomieszczenie, aby umożliwić robienie dokładnych pomiarów. W końcu, to Desains przedstawił pracę sugerującą wykorzystanie piezoelektryczności jako metody pomiaru: pracę, która wynikała z jego wskazówek.

Kilka lat później bracia opublikowali kompletne podsumowanie całej ich pracy [14], zawierające kilka diagramów ilustrujących aparaturę, którą opracowali i wykorzystywali. W końcu w 1895 r. zostali nagrodzeni za swoją pracę nad piezoelektrycznością nagrodą Planté {nagroda ustanowiona na cześć Gaston Planté (1834-1889), francuskiego naukowca, który wynalazł akumulator kwasowo-ołowiowy}.

Podczas, gdy piroelektryczność pozostała niewyjaśnioną akademicką osobliwością, piezoelektryczność znalazła szerokie zastosowanie zarówno przemysłowe, jak i metrologiczne, włączając w to kluczową rolę w pionierskich pomiarach radioaktywności. Między innymi, jednym z pierwszych zastosowań było wykorzystanie przy czujnikach dla nagrań gramofonowych, kwarcowo-kontrolowanych standardów częstotliwości oraz podwodnych echosondach. Powojenny rozwój aparatury medycznej z piezoelektrycznymi przetwornikami pokazał, jak wielkie znaczenie miały pionierskie badania krystalograficzne, przeprowadzone w XIX w.

Wybrano i w pełni przetłumaczono na język angielski dwa kluczowe doniesienia [5, 10]. Na tyle, na ile było to możliwe, zachowano oryginalny układ, by uniknąć tworenia znacznie dłuższych akapitów. Uwzględniono przypisy i odniesienia. Wszystkie notatki są ściśle i zwięzłe, podobne pod względem formy do współczesnych rozszerzonych streszczeń i nie zawierają rysunków. Dokumenty zachowały przejrzystość i świeżość, reprezentowaną przez młodych naukowców u progu ich karier, kiedy to odkryli zupełnie nowe zjawisko.

Francis A. Duck PhD, DSc
Medical Physics and Bioengineering Department
Royal United Hospital
Bath, BA1 3NG
United Kingdom
e-mail: f.duck@bath.ac.uk

Załącznik A

Fizyka Kryształu – Wytwarzanie elektryczności biegunowej poprzez ciśnienie w hemiedrycznych kryształach z nachylnymi bokami. Notatka sporządzona przez Jacquesa i Pierre'a Curie. Zaprezentowana przez Pana Friedela. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1880; 91: 294-295.

1. Kryształy z jedną lub dwoma osiami o niesymetrycznych końcach, innymi słowy kryształy hemiedryczne o nachylnych bokach, posiadają specjalne właściwości fizyczne, które generują dwa elektryczne pola przeciwnych znaków na końcach wyżej wspomnianych osi, kiedy są poddawane zmianom temperatury: jest to zjawisko znane jako *piroelektryczność*.

Odkryliśmy nowy sposób wytwarzania elektryczności biegunowej w tych samych kryształach, poddając je zmiennemu ciśnieniu wzdłuż ich osi hemiedrycznej [1]. Uzyskane efekty są całkowicie podobne do uzyskanych przez podgrzewanie: w trakcie kompresji; końce osi zachowywały się jak naładowane przeciwnymi prądami. Kiedy kryształ został sprowadzony do jego neutralnego stanu poprzez usunięcie ciśnienia, zjawisko wystąpiło ponownie, ale z odwróconymi ładunkami. Koniec, który uzyskał ładunek dodatni w trakcie kompresji, zamienia się na ujemny w trakcie dekompresji, i *vice versa* [2].

Eksperyment składa się z cięcia kryształu, tak aby otrzymać dwie równoległe powierzchnie, które są prostopadłe do osi hemiedrycznej, będące przedmiotem badania. Obie są pokryte dwiema cynfoliami, odizolowanymi na zewnątrz przez dwa arkusze wzmocnionej gumy. Kiedy całość jest umieszczona pomiędzy, dajmy na to, szczękami imadła, ciśnienie może zostać przyłożone do dwóch uciętych boków, wzdłuż osi hemiedrycznej. Użyliśmy elektrometru Thompsona w celu zaobserwowania elektryczności. Różnica napięcia może być wykryta przez zetknięcie każdej z cynfolii z ćwiartkami przyrządu, w ten sposób igła jest ładowana znaną ilością prądu. Oddzielny odczyt każdego z ładunków można uzyskać poprzez zetknięcie jednej z cynfolii z ziemią, druga pozostaje w zetknięciu z igłą, dwa ćwiartkowe elementy są ładowane przez baterię.

Pomimo, że nie przestudiowaliśmy jeszcze praw rządzących tym zjawiskiem, możemy powiedzieć, że ma ono charakter piroelektryczności, zdefiniowanej przez Gauguina w jego godnej podziwu pracy na temat turmalinu.

[1] *Bulletin de la Société minérologique*, 1880.

[2] Kryształy hemiedryczne o nachylnych powierzchniach są jedynymi piroelektrycznymi kryształami; tylko one są w stanie uzyskać elektryczność biegunową poprzez kompresję. Niektóre kryształy holoedryczne, jak na przykład fluoryt, stają się dobrze naładowane w trakcie kompresji, ale tylko jednym prądem; jest to zjawisko powierzchniowe, całkowicie inne i daje efekt, który jest niewykrywalny w warunkach naszych eksperymentów.

2. Porównaliśmy dwa sposoby pozyskiwania elektryczności biegunowej na serii nieprzewodzących substancji, wszystkie hemiedryczne z nachylenymi bokami, co uwzględnia prawie każdą substancję znaną jako piroelektryczną [3]. Efekt cieplny był badany przy użyciu bardzo eleganckiej metody zaproponowanej przez pana Friedela [4]. Nasze eksperymenty były przeprowadzone na blendzie cynkowej, chloranie sodu, boracycie, turmalinie, kwarcu, kalaminie, topazie, cukrze i soli Seignette'a.

Na wszystkich tych kryształach poddanych działaniu ciśnienia, zaobserwowano te same efekty w tych samych kierunkach, co w trakcie chłodzenia. Efekty dekompresji działają w takim samym kierunku, jak w trakcie podgrzewania. Związek jest wystarczająco oczywisty, aby w obu przypadkach zaobserwowane zjawisko przypisać jednej przyczynie i podsumować następującym stwierdzeniem:

Cokolwiek stanowi przyczynę, za każdym razem, gdy nieprzewodzące hemiedryczne kryształy z nachylenymi bokami kurczą się, następuje tworzenie elektrycznych biegunów w danym kierunku. Za każdym razem, kiedy kryształ rozszerza się, następuje produkcja elektryczności w przeciwnym kierunku.

Jeśli nasze obserwacje są prawdziwe, stosowanie ciśnienia wzdłuż osi hemiedrycznej musi wywierać ten sam efekt, co podgrzewanie substancji posiadających ujemny wskaźnik rozszerzalności [5].

Załącznik B

Elektryczność. Kurczenie się i rozszerzanie wywołane napięciem elektrycznym w hemiedrycznych kryształach o nachylenych bokach. Notatka sporządzona przez Jacquesa i Pierre'a Curie, zaprezentowana przez pana Friedela. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1881; 93: 1137-1140.

Zakładając, że ciało stałe, na przykład szklana pryzma, o powierzchni 0,01 m zostaje poddana zmianom równoważnym 1 milionowej jej długości, to ilość ta będzie bardzo trudna do zaobserwowania w metodzie bezpośredniej. Jeśli jednak zmiana w długości jest przeciwna, w taki sposób, że nie występuje, ciało stałe podda się zmiennemu naciskowi bliskiemu 1 kg. Czuły system, który umożliwiłby pomiar tego nacisku, mógłby również pomóc

w pośredni sposób rejestrować różnice długości, które mogłyby mieć miejsce. Można zauważyć, że ta metoda jest oparta na małym wskaźniku ścisłości ciał stałych.

Stworzyliśmy aparaturę spełniającą te warunki poprzez wykorzystanie właściwości kwarcu, które poddane ciśnieniu w danym kierunku, produkują ilości prądu proporcjonalne do dostarczanego ciśnienia. Opiszemy tę aparaturę i podamy szczegóły jej wykorzystania, aby wyjaśnić dwustronność zjawiska polaryzacji elektrycznej hemiedrycznych kryształów.

Wiemy, że jeżeli hemiedryczny kryształ z nachylenymi bokami jest poddany różnemu ciśnieniu wzdłuż osi hemiedrycznej, równe i przeciwne wartości elektryczności są produkowane na obu końcach tej osi, a znaki zależne są od różnicy ciśnienia. Nasze ostatnie eksperymenty wykazały, że jeśli dwa końce osi hemiedrycznego kryształu zostaną naładowane prądami o przeciwnych znakach, to kryształ ten albo kurczy się albo rozszerza wzdłuż tej osi, zgodnie z kierunkiem potencjału elektrycznego. Kierunki tych dwóch wzajemnych zjawisk są powiązane przez następujące ogólne prawo głoszone przez pana Lippmanna, a które jest niczym więcej jak uogólnieniem prawa Lenza: „Kierunek jest zawsze taki, że wtórne zjawisko przeciwdziała zjawisku pierwotnemu.” Pan Lippmann, oparłszy swój wywód na zasadach zachowania elektryczności, zachowania energii oraz bezpośrednich właściwościach zjawiska, był w stanie przewidzieć i zademonstrować wszystkie właściwości zjawiska wtórnego [1]. Zasugerował nawet sposób jego pomiaru dla zadanej różnicy potencjału, zakładając znaną ilość prądu wytworzonego przez ciśnienie.

Wcześniej pokazaliśmy ilość prądu wytworzonego przez turmalin i kwarc dla ciśnienia 1 kg [2]. Obliczenia pokazują, że pryzmy tych substancji ulegną zmianie długości wynoszącej około 1/20000 mm przy różnicy potencjału odpowiadającej iskrze 0,001 m w powietrzu (Notatka w tłumaczeniu: jest to równoważne około 8 kV).

Przedstawiamy szczegóły eksperymentów: aparatura jest utworzona z dwóch masywnych płyt z brązu, połączonych razem przez trzy duże kolumny, przytwierdzone do jednego krążka i przechodzące przez drugi, zakończone śrubami i nakrętkami. Przy użyciu tych nakrętek można ścisnąć kilka elementów, umieszczonych jeden na drugim pomiędzy tymi krążkami. Elementy są podzielone na dwa różne układy:

Dolny układ służy tylko do pomiaru zmian ciśnienia. Składa się z trzech cienkich i szerokich taśm kwarcowych, oddzielonych metalowymi foliami, które stykają się

[3] Można przypuszczać, że istnieje wiele innych wśród sztucznych substancji krystalicznych. Na przykład substancje, które są aktywne pod światłem spolaryzowanym, wytwarzają kryształy, dla których niektóre osie mają niepodobne końce.

[4] *Bulletin de la Société minéralogique*, 1879.

[5] Ta praca została przeprowadzona w laboratorium mineralogii na wydziale nauk ścisłych.

[1] Zasada zachowania elektryczności. *Annales de Chimie et de Physique* 1881 p145.

[2] *Comptes rendus de l'Académie des sciences* XCIII, p. 204.

z elektrometrem w celu zmierzenia prądu, produkowanego przez zmiany ciśnienia na kwarcowych taśmach.

Górny system służy wywołaniu zjawiska będącego przedmiotem badania. W naszym eksperymencie składał się on z trzech hemiedrycznych kryształów o możliwie dużej objętości, oddzielonych od siebie miedzianymi dyskami. Osie hemiedryczne tych kryształów były równoległe do kierunku ciśnienia. Dwa zewnętrzne kryształy były obrócone w stosunku do środkowego w taki sposób, że jeden z miedzianych dysków stykał się z dwoma dodatnimi podstawami pod ciśnieniem, a drugi z ujemnymi. Dwie zewnętrzne podstawy trzech kryształów stykały się z ziemią. Miedziane dyski mogły być połączone z dwoma biegunami maszyny Holtza.

Eksperymentowaliśmy na turmalinie i kwarcu. Dla obu substancji, kiedy dodatni koniec maszyny Holtza był połączony z miedzianym dyskiem, pozostającym w kontakcie z dodatnimi bokami kryształów w czasie kurczenia, a ujemny koniec połączony z dyskiem stykającym się z ujemnymi bokami – kryształy rozszerzały się wzdłuż osi ciśnienia, a elektrometr wskazuje to rozszerzenie przez dolny system, w którym następuje wzrost napięcia. Gdy maszyna zatrzymuje się, elektrometr nadal wskazuje napięcie. W końcu, kiedy kierunek prądu odwróci się, kryształy kurczą się i wszystkie efekty zostają odwrócone. W zjawisku tym próg napięcia odpowiada półmilimetrowej iskrze. Wydaje się to być proporcjonalne do różnicy napięcia. Jak dotąd nie jesteśmy w stanie podać pomiaru, a jedynie przybliżone obliczenia (przy niedokładnych danych) dla kwarcu, które pokazały, że zjawisko to ma tę samą wielkość jak przewidywana [3].

Piśmiennictwo

1. Curie Marie. *Pierre Curie*. Tłumaczenie Charlotte & Vernon Kellogg. New York: Macmillan, 1923.
2. Mould RF. Pierre Curie 1859-1906. *Nowotwory J Oncology* 2006; 56: 147-55.
3. Friedel C, Cumenge E. Sur un nouveau minerai d'urane, la carnotite. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1899 ; 128: 532-4.
4. Chiappero PJ. Gîtologie et minéralogie de l'uranium et du thorium. W: Schubnel HJ (red.). *Histoire Naturelle de la radioactivité*. Paris : Galerie de Minéralogie et de Géologie Jardin des Plantes, 1996, pp 76-78.
5. Curie J, Curie P. Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémiedre à faces inclinées. Présentée par M. Friedel. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1880; 91: 294-5.
6. Curie J, Curie P. Sur l'électricité polaire dans les cristaux hémiedre à faces inclinées. Présentée par M. Desains. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1880; 91: 383-6.
7. Curie J, Curie P. Lois du dégagement de l'électricité par pression, dans la tourmaline. Présentée par M. Friedel. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1881; 92: 186-8.
8. Curie J, Curie P. Les cristaux hémiedre à faces inclinées, comme sources constants d'électricité. Présentée par M. Desains. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1881; 93: 204-7.
9. Curie J, Curie P. Sur les phénomènes électriques de la tourmaline et des cristaux hémiedre à faces inclinées. Présentée par M. Friedel. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1881; 92: 350-3.
10. Curie J, Curie P. Contractions et dilatations produites par des tensions électriques dans les cristaux hémiedres à faces inclinées, Présentée par M. Friedel. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1881; 93: 1137-40.
11. Curie J, Curie P. Déformations électriques du quartz. Présentée par M. Desains. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1882; 95: 914-7.
12. Curie J, Curie P. Phénomènes électriques des cristaux hémiedre à faces inclinées. *J de Physique* 2nd series 1882; 1: 245-51.
13. Curie J, Curie P. Quartz piézo-électrique, *Phil Mag* 1893; 36: 340-2.
14. Curie J, Curie P. Dilatation électrique du quartz, *J de Physique*, 2nd series 1889; 8: 149-70.

[3] Dwa systemy, które są wykorzystywane do generowania zjawiska elektrycznego oraz jego pomiaru, są idealnie oddzielone od siebie. Z elektrycznego punktu widzenia, są one idealnie zamknięte w uziemionych, metalowych pojemnikach. Wykonaliśmy liczne pomiary, które utwierdziły nas w przekonaniu, że zjawisko nie wystąpiło przez przypadek. Były one konieczne w celu potwierdzenia bardzo małych ilości prądu, uwolnionego przy olbrzymich napięciach występujących w maszynie Holtza.