

doi:10.15199/48.2022.07.10

Zastosowanie efektu tunelowego w akcelerometrach o wysokiej czułości

Streszczenie. We wstępie artykułu opisano kwantowo-mechaniczny efekt tunelowy. Wykonano obliczenia strzałki ugięcia mikrobekki krzemowej pod wpływem przyspieszenia. Obliczono też natężenie prądu tunelowego, płynącego przez złącze utworzone między końcem igły o atomowej grubości ostrza zamocowanej na mikrobelce i powierzchnią. Przedstawiono projekt czujnika przyspieszenia o wysokiej czułości, w którym zastosowano układy takich złącz połączone szeregowo i równoległe. Przedyskutowano otrzymane wyniki oraz możliwości zastosowania takich czujników przyspieszenia w szczególności jako precyzyjnych grawimetrów.

Abstract. The quantum-mechanical tunneling effect is described in introduction of the article. Computation of the bending arrow of the microcantilever undergo acceleration are conducted. A tunneling current intensity flowing in the junction between tip of the needle with atomic size thickness connected with the microcantilever made of silicone and surface are also executed. The project of the high sensitivity accelerometer based on systems of the junction connected parallel and in series is presented. Obtained results and feasibility of the application of the considered system in accelerometers, especially in precision gravimeters are discussed. (**Application of tunnel effect in very sensitive accelerometers**)

Słowa kluczowe: efekt tunelowy, połączenie, akcelerometr, grawimetr, zastosowanie.

Keywords: tunneling effect, connection, accelerometer, gravimeter, application.

Wstęp

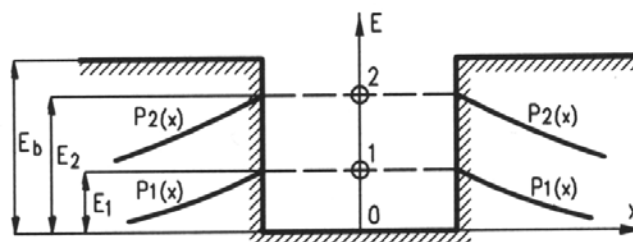
Przyspieszenie jest jedną z podstawowych wielkości fizycznych. Ta wielkość jest również często używana i ma duże znaczenie w technice, ponieważ w każdym ruchu niejednostajnym występuje przyspieszenie. W rzeczywistych warunkach technicznych ruchy jednostajne też mają swój początek i koniec. To oznacza, że poprzedzają je i kończą ruchy niejednostajne, w których pojawia się dodatnie albo ujemne przyspieszenie. Przyrządy używane do mierzenia przyspieszenia są nazywane ogólnie akcelerometrami [1]. Niektóre akcelerometry przeznaczone do pomiaru określonego rodzaju przyspieszenia mają swoje specjalne nazwy, np. grawimetry są przeznaczone do pomiaru przyspieszenia siły ciężkości, seismografy do pomiaru przyspieszenia drgań skorupy ziemskiej [2-4]. Zakres mierzonych w technice przyspieszeń jest bardzo szeroki i zawiera się od ok. 10^{-18} m/s² (przyspieszenie przemieszczania się niektórych obiektów budowlanych w wyniku osuwania gruntu) do 10^6 m/s² (przyspieszenie pocisków w lufie i ultrawirówek) [5]. Dlatego istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych przystosowanych do tego celu akcelerometrów, w których wykorzystuje się różne połączenia zjawisk fizycznych [6, 7].

Jednym z obiecujących kierunków rozwoju tych przyrządów jest wykorzystanie zminiaturyzowanych elementów (o rozmiarach od kilku mm do kilku dziesiątych części mm i mniejszych) wykonanych z monokrystalicznego krzemu. Są to tzw. systemy MEMS (micro-electromechanical systems) i NEMS (nano-electromechanical systems) [8, 9]. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie projektów akcelerometru z wykorzystaniem efektu tunelowego do wykrywania zmian położenia MEMS/NEMS. Efekt tunelowy jest jednym ze zjawisk opisywanych przez mechanikę kwantową [10].

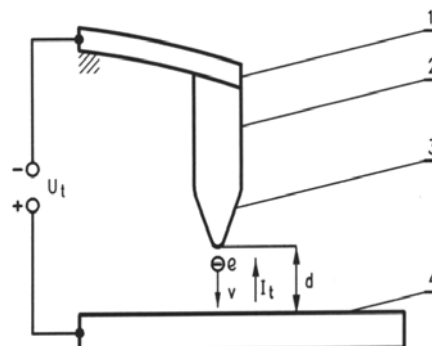
Efekt tunelowy

Wspomniany efekt polega na przenikaniu mikrocząstek, np. elektronów, przez barierę potencjału (rys. 1). Przenikanie zachodzi, mimo, że energie kinetyczne mikrocząstek E_1 , E_2 są mniejsze od energii potrzebnej do pokonania tej bariery potencjału E_b i zgodnie z mechaniką klasyczną takie przenikanie jest niemożliwe. Istnieje wiele sposobów wytworzenia bariery potencjału dla mikrocząstek,

przez którą będzie zachodził efekt tunelowy. Jednym z nich jest zbudowanie układu złożonego z metalowej igły o cienkim ostrzu, umieszczonym w pobliżu powierzchni innego materiału i przyłożenie do tych elementów napięcia elektrycznego U_t (tzw. napięcie tunelowe, rys. 2). Zarówno promień ostrza jak i jego odległość od powierzchni d , powinny wynosić 10^{-9} - 10^{-10} m, czyli być rzędu ułamka nanometra. W dalszych częściach artykułu taki układ będzie nazywany złączem tunelowym.

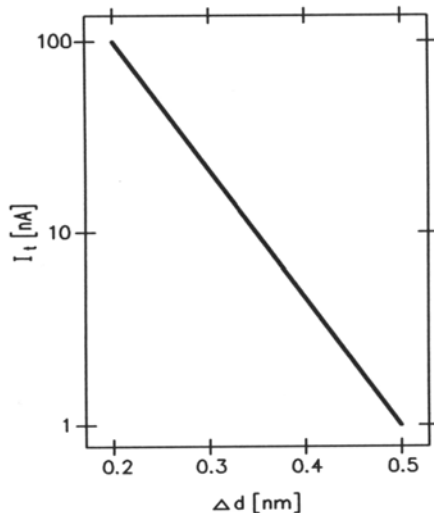


Rys. 1. Wyjaśnienie efektu tunelowego dla mikrocząstki w prostokątnej studni potencjału; E_b , E_1 , E_2 – energie odpowiednio: bariery potencjału oraz mikrocząstki w stanie o energii E_1 i E_2 , x – współrzędna, $p_1(x)$, $p_2(x)$ – prawdopodobieństwo znalezienia mikrocząstki o energii E_1 i E_2 w punkcie o współrzędnej x



Rys. 2. Schemat budowy złącza tunelowego; 1 – mikrobekka, 2 – igła, 3 – ostrze igły, 4 – powierzchnia próbki, I_t – prąd tunelowy, U_t – napięcie przyłożone do złącza (napięcie tunelowe), d – odległość między ostrzem igły i powierzchnią próbki (szerokość złącza), e , v – odpowiednio: ładunek i prędkość elektronu

Prawdopodobieństwo przenikania cząstek przez barierę potencjału w efekcie tunelowym bardzo szybko zmienia się wraz ze zmianą szerokości bariery. Ta zależność jest opisywana przez funkcję wykładniczą. W rozpatrywanym złączu przenikającymi cząstkami są elektrony, przechodzące przez szczelinę między końcem igły i powierzchnią materiału. Te elektrony tworzą prąd tunelowy o natężeniu I_t . Zmiana szerokości szczeliny o wartość Δd wynoszącą ok. 1 \AA (10^{-10} m) powoduje zmianę natężenia prądu tunelowego I_t o rząd wielkości (rys. 3), [11, 12].



Rys. 3. Typowy przykład zależności natężenia prądu tunelowego I_t od szerokości złącza Δd

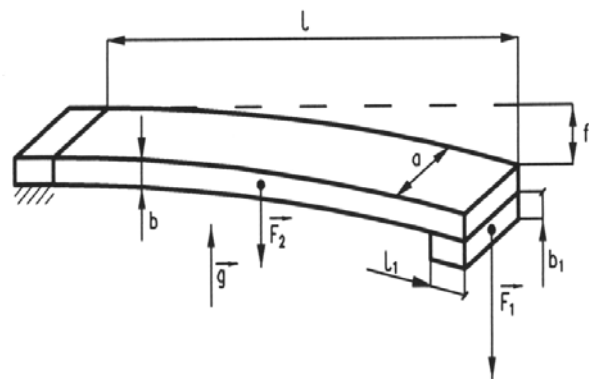
Stąd wynika niezwykle wysoka czułość układów wykorzystujących efekt tunelowy, który został zastosowany, m.in. do budowy skaningowego mikroskopu tunelowego (STM – Scanning Tunneling Microscope). Dzięki temu urządzeniu możliwe jest badanie powierzchni ciała stałego, mikroorganizmów, a nawet powierzchni cieczy z rozdzielczością sięgającą skali atomowej [13]. Podstawowym podzespołem STM jest właśnie rozpatrywany układ, który składa się z igły o bardzo cienkim ostrzu, wykonanej najczęściej z wolframu lub molibdenu i umieszczonej w odległości rzędu nanometrów nad powierzchnią badanej próbki. Ruch igły na powierzchnię próbki jest powodowany przez układ trzech wzajemnie prostopadłych elementów piezoelektrycznych.

Ugięcie mikrobjelki

Przeanalizowane zostanie teraz zachowanie się jednostronnie zamocowanej, sprężystej mikrobjelki 1 o przekroju poprzecznym w kształcie prostokąta z obciążnikiem 2, połączonym z jej swobodnym końcem (rys. 4). Mikrobjelka jest umieszczona w polu sił spowodowanym przez przyspieszenie g , skierowane prostopadle do kierunku wyznaczonego przez długość mikrobjelki w stanie nieugiętym. W tej sytuacji na obciążnik działa siła F_1 , a na mikrobjelkę siła F_2 . Te siły powodują ugięcie mikrobjelki. Symbol g oznacza przyspieszenie siły ciężkości, albo przyspieszenie spowodowane ruchem niejednostajnym mikrobjelki wraz z jej zamocowaniem. W tym drugim przypadku, zgodnie z zasadą równowagi, na mikrobjelkę i obciążnik działają siły bezwładności, powodujące ten sam skutek.

Całkowita strzałka ugięcia f mikrobjelki jest sumą strzałek ugięcia f_1 , f_2 , spowodowanych odpowiednio przez siły F_1 i F_2 . Zgodnie z tym

$$(1) \quad f = f_1 + f_2$$



Rys. 4. Wymiary mikrobjelki 1 z obciążnikiem 2; l , a , b , f – odpowiednio długość, szerokość, grubość i strzałka ugięcia mikrobjelki, l_1 , b_1 – odpowiednio długość i grubość obciążnika, g – przyspieszenie, F_1 , F_2 – siły bezwładności działające odpowiednio na obciążnik i mikrobjelkę

Strzałka ugięcia f mikrobjelki pod działaniem siły o wartości F , przyłożonej w odległości l od punktu zamocowania mikrobjelki wyraża się ogólnym wzorem

$$(2) \quad f = c \frac{Fl^3}{EI}$$

w którym: E oraz I oznaczają odpowiednio: moduł Younga materiału mikrobjelki i moduł bezwładności jej przekroju geometrycznego, natomiast c jest współczynnikiem, zależnym od rozkładu przestrzennego siły. Dla siły skupionej $c = c_1 = 1/3$, zaś dla siły rozłożonej w sposób ciągły wzdłuż długości belki (np. jej ciężaru) $c = c_2 = 3/8$. Zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na rys. 4 i wzorami (1) i (2) strzałki ugięcia f_1 , f_2 można obliczyć ze wzorów

$$(3) \quad f_1 = c_1 \frac{F_1 \left(l - \frac{l_1}{2} \right)^3}{EI}$$

$$(4) \quad f_2 = c_2 \frac{F_2 l^3}{EI}$$

Siły F_1 , F_2 wyrażają się przez iloczyny mas odpowiednio obciążnika i mikrobjelki oraz przyspieszenia g . Gdy g oznacza przyspieszenie ziemskie, to siły F_1 , F_2 są ciężarami tych elementów. Zgodnie z tym oraz z rys. 4 ciężary W_1 , W_2 wyrażają się wzorami

$$(5) \quad W_1 = ab_1 l_1 \rho_1 g$$

$$(6) \quad W_2 = abl \rho_2 g$$

Symbole ρ_1 , ρ_2 oznaczają odpowiednio gęstość materiału obciążnika i mikrobjelki. Moduł bezwładności przekroju geometrycznego mikrobjelki oblicza się ze wzoru [5]

$$(7) \quad I = \frac{1}{12} ab^3$$

Po podstawieniu wzorów (5), (6) odpowiednio do wzorów (3) i (4), a następnie otrzymanych wzorów do wzoru (1), otrzymuje na całkowitą strzałkę ugięcia f następujący wzór

$$(8) \quad f = \frac{l^3}{Eb^3} \left[4 \left(1 - \frac{l_1}{2l} \right)^3 \frac{b_1 l_1}{b} \rho_1 + \frac{3}{2} l \rho_2 \right] g$$

Ze wzoru (8) wynika, że całkowita strzałka ugięcia f zależy w sposób liniowy od przyspieszenia g oraz od szeregu parametrów charakteryzujących materiał i wymiary mikrobekki oraz obciążnika. Dlatego można wprowadzić współczynnik belki w , zależny tylko od tych parametrów i wyrażający się wzorem

$$(9) \quad w = \frac{l^3}{Eb^3} \left[4 \left(1 - \frac{l_1}{2l} \right)^3 \frac{b_1 l_1}{b} \rho_1 + \frac{3}{2} l \rho_2 \right]$$

Wtedy wzór na całkowitą strzałkę ugięcia mikrobekki można zapisać w prostej postaci

$$(10) \quad f = wg$$

Przyjmując, że zostanie zastosowana typowa mikrobekka, przedstawiona na rys. 4, o wymiarach: $l = 5$ mm, $a = 1$ mm, $b = 0,2$ mm, wykonana z krzemu ($\rho_2 = 2,328 \cdot 10^3$ kg/m³, $E = 1,11 \cdot 10^{11}$ N/m²) z przymocowanym na jej końcu obciążnikiem o rozmiarach $l_1 = b_1 = 0,5$ mm, wykonanym z wolframu ($\rho_1 = 22,61 \cdot 10^3$ kg/m³), ze wzoru (9) otrzymuje się $w = 3,21 \cdot 10^{-9}$ s². Z kolei przyjmując jako g standardową wartość przyspieszenia ziemskiego ($g = 9,8065$ m/s²), ze wzoru (10) otrzymuje się całkowitą strzałkę ugięcia mikrobekki $f = 31,59$ nm.

Pojedyncze złącze

Rozpatrywana mikrobekka krzemowa z obciążnikiem może być zaopatrzona na swobodnym końcu w metalową igłę i zbliżona do powierzchni metalu. Przy spełnieniu wcześniej podanych warunków taki układ będzie stanowił pojedyncze złącze tunelowe. Jak również podano wcześniej, zależność natężenia prądu tunelowego I_t od zmiany szerokości złącza Δd jest opisana funkcją wykładniczą, którą można wyrazić wzorem

$$(11) \quad I_t = I_0 e^{-k\Delta d}$$

Symbol k we wzorze (11) będzie nazywany współczynnikiem proporcjonalności złącza dla zamian odległości i zależny m.in. od pracy wyjścia elektronów z materiału igły. Współczynnik k może być obliczony metodami mechaniki kwantowej po rozwiązaniu równania Schrödingera dla elektronów w studni potencjału [1]. Znacznie łatwiej można jednak obliczyć wartość tego współczynnika na podstawie danych doświadczalnych, których typowe wartości dla igły wolframowej, stosowanej w STM są podane na rys. 3 [11, 12]. Ponieważ zależność przedstawiona na tym rysunku jest funkcją liniową dla natężenia prądu tunelowego I_t podanego w skali logarytmicznej, to współczynnik k można obliczyć ze wzoru

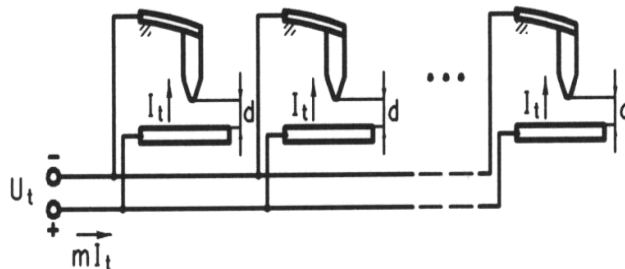
$$(12) \quad k = \frac{\ln I_0 - \ln I_t}{\Delta d}$$

Korzystając z wartości podanych na wykresie przedstawionym na rys. 3 i ze wzoru (12) otrzymano $k = 15,35$ nm⁻¹ oraz $I_0 = 100$ nA.

Układy złącz

Natężenie prądu I_t , płynącego przez pojedyncze złącze tunelowe jest stosunkowo małe. Ponadto, wraz ze zwiększeniu odległości między końcem igły a powierzchnią Δd natężenie I_t szybko maleje. Dla dużych wartości Δd to natężenie będzie tak małe, że pojawiają się trudności związane z jego pomiarem lub jego zmiany będą poniżej

granicy czułości dostępnego miernika. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie układów złącz tunelowych. W tych układach są możliwe są trzy sposoby połączenia złącz ze sobą – równoległe, szeregowe i mieszane, będące kombinacją połączenia szeregowego i równoległego. Schemat połączenia równoległego m jednakowych złącz jest pokazany na rys. 5.

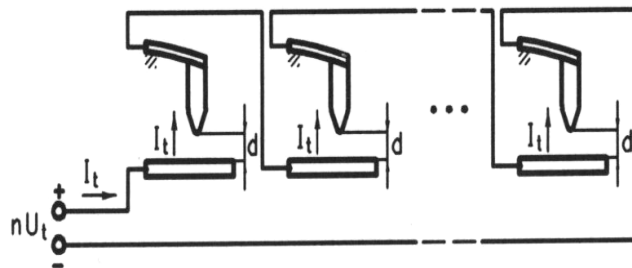


Rys. 5. Schemat układu m równoległe połączonych złącz tunelowych; U_t – napięcie tunelowe, I_t – natężenie prądu tunelowego, d – szerokość złącza.

W tym układzie do każdego ze złącz jest przyłożone takie same napięcie tunelowe U_t , a natężenie prądu płynącego przez układ I_{tr} jest iloczynem natężeń prądów płynących przez każde z tych złącz. Zgodnie z tym można napisać wzór

$$(13) \quad I_{tr} = m I_0 e^{-k\Delta d}$$

Schemat połączenia szeregowego n jednakowych złącz tunelowych jest pokazany na rys. 6.



Rys. 6. Schemat układu n szeregowo połączonych złącz tunelowych; U_t – napięcie tunelowe, I_t – natężenie prądu tunelowego, d – szerokość złącza

Przez taki układ przepływa prąd tunelowy o natężeniu I_{ts} , a do układu jest przyłożone napięcie nU_t . Do przepływu prądu przez taki układ konieczne jest zajście efektu tunelowego we wszystkich złączach. Ponieważ efekty tunelowe w każdym złączu są zdarzeniami niezależnymi, to prawdopodobieństwo wystąpienia takiego zdarzenia jest równe iloczynowi prawdopodobieństw zajścia efektu tunelowego w pojedynczym złączu. To prawdopodobieństwo wyraża się czynnikiem stanowiącym funkcję wykładniczą, występującą we wzorze (11). Zgodnie podanymi warunkami dla tego układu można napisać wzór.

$$(14) \quad I_{ts} = I_0 e^{-nk\Delta d}$$

Dla układu złącz tunelowych połączonych w sposób mieszany i składającego się z m szeregów połączonych równoległe, z których każdy zawiera n złącz połączonych szeregowo, natężenie prądu tunelowego zostanie oznaczone przez I_u . Na podstawie wzorów (13) i (14) I_u wyraża się wzorem

$$(15) \quad I_u = m I_0 e^{-nk\Delta d}$$

Jeżeli w rozpatrywanym układzie nastąpi zmiana strzałki ugięcia każdej z mikrobelki o Δf i przez to zmiana odległości między ostrzem każdej z igieł a powierzchnią, wtedy natężenie prądu płynącego przez układ będzie I_{u1} i wyrazi się wzorem

$$(16) \quad I_{u1} = mI_0 e^{-nk(\Delta d + \Delta f)} = I_u e^{-nk\Delta f}$$

Niech zmiana strzałki ugięcia Δf będzie spowodowana przez zmianę przyspieszenia Δg , wtedy zgodnie ze wzorem (10) można napisać

$$(17) \quad \Delta f = w\Delta g$$

Zmiana natężenia prądu płynącego przez układ ΔI_u , wynikająca w końcowym efekcie ze zmiany przyspieszenia Δg wyraża się wzorem

$$(18) \quad \Delta I_u = I_{u1} - I_u$$

Po podstawieniu wzoru (17) do (16) i wykorzystaniu wzoru (18) otrzymuje się wzór, pozwalający obliczyć Δg

$$(19) \quad \Delta g = -\frac{1}{nkw} \ln\left(1 - \frac{\Delta I_u}{I_u}\right)$$

Minimalna i dająca się wykryć zmiana natężenia prądu w układzie jest ograniczona przez czułość przyrządu pomiarowego ΔI_s [14]. Przyjmując $\Delta I_s = \Delta I_u$ można obliczyć ze wzoru (19) najmniejsze zmiany przyspieszenia Δg , wykrywane przez układ. Dla $\Delta I_s = 1$ nA i układu złącz połączonych w sposób mieszany, spełniającego warunek $n = m = 1, 2, \dots, 10$, obliczone wartości Δg zostały podane w tab. 1.

Tabela 1. Wartość granicy czułości akcelerometru Δg w zależności od liczby złącz tunelowych m, n dla $m = n$ i mierzalnej zmiany natężenia prądu tunelowego w układzie $\Delta I_u = 0,1$ nA.

Lp.	n, m ($n = m$)	$\Delta g \cdot 10^{-6}$ [m/s ²]
1	1	20,3
2	2	5,09
3	3	2,25
4	4	1,27
5	5	0,813
6	6	0,576
7	7	0,406
8	8	0,312
9	9	0,247
10	10	0,203

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone obliczenia pozwalają wyciągnąć wniosek, że pojedyncze złącze tunelowe, składające się z rozpatrywanej mikrobelki krzemowej z obciążnikiem i igłą o atomowej grubości ostrza zbliżonym do powierzchni, wykazuje wysoką czułość na działanie sił spowodowanych zmianami przyspieszenia. Strzałka ugięcia f takiej mikrobelki pod wpływem ziemskiego pola siły ciężkości wynosi ponad 30 nm, a odpowiadające temu zmiany natężenia prądu tunelowego, płynącego przez złącze ΔI_s są, jak wynika ze wzoru (11) łatwo mierzalne przy użyciu współczesnych przyrządów. Zastosowanie rozpatrywanego, pojedynczego złącza tunelowego jest wystarczające do budowy akcelerometrów przeznaczonych do pomiarów często wykonywanych w technice, np. przyspieszeń podczas pracy maszyn, które są rzędu 10^{-3} – 10 m/s² [5]. Pojedyncze złącze okazuje się jednak niewystarczające do budowy akcelerometrów, przeznaczonych do wykrywania małych zmian przyspieszenia, np. precyzyjnych

grawimetrów, stosowanych w geologii poszukiwawczej lub geodezji fizycznej [4, 15]. W tej sytuacji niezbędne jest zastosowanie układów złącz tunelowych, połączonych ze sobą równolegle, szeregowo lub w sposób mieszany.

Ze wzoru (13) wynika, że połączenie równoległe m złącz tunelowych powoduje zwiększenie m razy całkowitego natężenia prądu płynącego przez układ I_{tr} , uzyskanego przy danym napięciu tunelowym U_t . Dzięki temu, że zmiany natężenia prądu tunelowego, płynącego przez każde złącze się sumują i wtedy całkowita zmiana prądu spowodowana przez niewielkie zmiany strzałki ugięcia mikrobelki w każdym złączu jest łatwiej mierzalna. W przypadku połączenia szeregowego wykładnik występujący we wzorze (14) jest n razy większy, niż wykładnik we wzorach (11) i (13). Wynika stąd, że układ złącz tunelowych połączonych szeregowo jest znacznie bardziej czuły na zmiany odległości Δd między końcem igły i powierzchnią od pojedynczego złącza i układu złącz połączonych równoległe. Ponieważ jednak przy większych zmianach odległości Δd natężenie prądu w I_{tr} tym układzie bardzo szybko maleje, to mogą wystąpić trudności z jego pomiarem. W tej sytuacji korzystnym rozwiązaniem jest zwiększenie całkowitego prądu płynącego przez układ I_u , przez dodanie szeregów złącz tunelowych przyłączonych równoległe, czyli zastosowaniu połączenia mieszanego.

Wyniki obliczeń zebrane w tab. 1 pozwalają zauważyć, że rozbudowa układu o kolejne szeregi złącz tunelowych i kolejne złącza w szeregach powoduje zwiększenie czułości akcelerometru i umożliwiłaby pomiary coraz mniejszych zmian przyspieszenia Δg . Wzrost tej czułości zachodzi jednak coraz wolniej wraz ze wzrostem liczby szeregów m oraz liczby złącz n w tych szeregach i jest opisywany funkcją logarytmiczną. Stąd wniosek, że największe korzyści dałoby zastosowanie układów złożonych z kilku szeregów, zwierających po kilka złącz. Najmniejsza zmiany przyspieszenia Δg , którą można wykryć przy użyciu układu złożonego z 10 szeregów po 10 złącz wynosi ok. $2 \cdot 10^{-7}$ m/s². Najbardziej czułe i produkowane seryjnie grawimetry mają czułość ok. 100 razy większą [16]. Są to jednak bardzo kosztowne grawimetry nadprzewodnikowe, pracujące w temperaturze ciekłego helu, mające rozmiary ok. 1m i masę kilkudziesięciu kg. Z kolei grawimetry mechaniczne, wykorzystujące makroskopowe układy sprężyn lub wahadeł, też mają duże rozmiary i czułość 10^5 – 10^6 razy mniejszą, a ponadto wykazują bardzo dużą podatność na zakłócenia. Dlatego są prowadzone badania, mające na celu zbudowanie nowych typów grawimetrów nie mających wspomnianych wad [17]. Wykorzystanie w tym celu rozpatrywanych mikrobelki jest obiecującym kierunkiem tych badań. Grawimetr lub akcelerometr tego rodzaju miałby wysoką czułość i co ważne dla wielu zastosowań bardzo małe rozmiary i masę. Byłby też względnie tani, ponieważ produkcja układów MEMS i NEMS jest dobrze opanowana [18].

Autor: dr hab. inż. Stanisław Bednarek, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: stanislaw.bednarek@fis.uni.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Fraden J., Handbook of modern sensors: physics, designs and applications, Springer-Verlag, New York (2004), p. 42
- [2] Trojanowicz M., Osada E., Karsznia K., Precise local quasigeoid modeling using GNSS/leveling height anomalies and gravity data, *Survey Review* (2018), doi:10.1080/00396265.2018.1525981
- [3] Osada E., Kryński J., Owczarek M., A robust method of quasigeoid modeling in Poland based on GPS/leveling data, *Geodesy and Cartography*, 34 (2003), 99-117

- [4] Bednarek S., Antropogeniczne anomalie grawitacyjne i ich znaczenie, *Przegląd Geodezyjny*, 92 (2020), 15-19
- [5] Mizerski W. Tablice fizyczno-astronomiczne, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa (2013), s. 22
- [6] Jóźwik G., Kopiec D., Zawierucha P., Gotszalk T., Janus P., Grabiec P., Rangelow L. W., The spring constant calibration of the piezoresistive cantilever based biosensor, *Sensors and Actuators B; Chemical*, 170 (2012), p. 201-205
- [7] Ekinci K. L., Roukes M.L., Nanomechanical systems, *Review of Scientific Instruments*, 78 (2005), 1-12
- [8] Moczala M., Sierakowski A., Janus P., Grabiec P., Leśniewicz W., Gotszalk T., Progress in nanometrology of MEMS/NEMS systems, *Mechanics* (2016), no 11, 1611-1613
- [9] Moczala M., Babij M., Majstrzyk W., Sierakowski A., Dobrowolski R., Janus P., Grabiec P., Gotszalk T., Technology of thermally driver and magnetomotively detected MEMS microbridges, *Sensors and Actuators A; Physical*, 240 (2016), 17-22
- [10] Tipler P. A., Llewellyn R.A., Modern physics, W. C. Freeman and Company, New York (2008), p. 238
- [11] Binnig G., Rohrer H., Scanning tunneling microscopy – from birth to adolescence, *Review of Modern Physics*, 59 (1987), 615-625
- [12] Binnig G., Rohrer H., Gerber C., Weibel E., Surface studies by scanning tunneling microscopy, *Physical Review Letters*, 49 (1982), p. 57-61
- [13] Tortonese M., Barrett R. C., Quata C. F., Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection, *Applied Physics Letters*, 62 (1992) 675-679
- [14] Keithley J. E., Low level measurements, Precise DC current, voltage and resistance measurements, Keithley Instruments Inc., Cleveland, (2014), p. 1-5
- [15] Hirt C., Claessens S., Fecher T., Kuhn M., Pail R., New ultrahigh-resolution picture of Earth gravity field, *Geophysical Research Letters* 40 (2013), 4279-4283
- [16] Operating Principle of the Superconducting Gravity Meter, GWR Instrument Inc., San Diego (2017)
- [17] Li M., Tang H. X., Roukes M.L., Ultra-sensitive NEMS-based cantilevers for sensing scanned probe and very high-frequency applications, *Nature Nanotechnology*, 2 (2007), 114-120
- [18] Bednarek S., Grawimetr, *Opis patentowy* PL-234723, Wydawnictwo Urzędu Patentowego, Warszawa, (2020), s. 5