

АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ

ACOUSTOELECTRONIC SENSORS

УДК: 534:

АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ НА РЕЗОНАТОРАХ НІОБАТУ ЛІТІЮ

В. В. Курилюк, А. М. Горб, О. І. Половина, О. О. Коротченков

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
просп. Глушкова, 6, Київ, 03022, тел. (044) 526-05-10.
kuryluk@univ.kiev.ua, allochka@univ.kiev.ua, polovina@univ.kiev.ua, olegk@univ.kiev.ua

Анотація

АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ НА РЕЗОНАТОРАХ НІОБАТУ ЛІТІЮ

В. В. Курилюк, А. М. Горб, О. І. Половина, О. О. Коротченков

В роботі запропоновано акустоелектронний сенсор типу п'єзоелектрик-напівпровідник. Експериментально показано, що резонансні частоти такої структури зменшуються зі збільшенням концентрації носіїв заряду в напівпровідниковому шарі. Спостережуваний ефект обумовлений взаємодією між носіями заряду та п'єзоелектричними полями на межі поділу п'єзоелектрик-напівпровідник. За допомогою варіаційного методу Релея-Рітца проведено теоретичні розрахунки поверхневих розподілів пружних та п'єзоелектричних полів для деяких власних частот тривимірного п'єзоелектричного шару LiNbO_3 , який може бути використаний у такому сенсорі.

Ключові слова: акустоелектронний сенсор, п'єзоелектричний резонатор, структура п'єзоелектрик-напівпровідник, ніобат літію.

Abstract

ACOUSTOELECTRONIC SENSORS BASED ON LITHIUM NIOBATE RESONATORS

V. V. Kurylyuk, A. M. Gorb, O. I. Polovina, O. A. Korotchenkov

An acoustoelectronic sensor based on piezoelectric-semiconductor hybrid structure have been proposed in this study. The resonant frequencies of such a structure have been experimentally shown to decrease as the conductivity of a semiconductor layer increases. The effect observed is due to an interaction between charge carriers and piezoelectric fields at the piezoelectric-semiconductor interface. The surface distributions of both elastic and piezoelectric fields have been theoretically calculated by using the Rayleigh-Ritz variational method for some eigenfrequencies of a 3D LiNbO_3 piezoelectric layer.

Keywords: acoustoelectric sensor, piezoelectric resonator, piezoelectric-semiconductor structure, lithium niobate

Аннотация**АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ СЕНСОРЫ НА РЕЗОНАТОРАХ НИОБАТА ЛИТИЯ***В. В. Курилюк, А. Н. Горб, А. И. Половина, О. А. Коротченко*

В работе предложен акустоэлектронный сенсор типа пьезоэлектрик-полупроводник. Экспериментально показано, что резонансные частоты такой структуры уменьшаются при росте концентрации носителей заряда в полупроводниковом слое. Наблюдаемый эффект обусловлен взаимодействием между носителями заряда и пьезоэлектрическими полями на границе раздела пьезоэлектрик-полупроводник. С помощью вариационного метода Релея-Ритца проведены теоретические расчеты поверхностных распределений упругих и пьезоэлектрических полей для некоторых собственных частот трехмерного пьезоэлектрического слоя LiNbO_3 , который может использоваться в указанном сенсоре.

Ключевые слова: акустоэлектронный сенсор, пьезоэлектрический резонатор, структура пьезоэлектрик-полупроводник, ниобат лития.

Акустоелектронні сенсори є широко вживаними приладами для контролю фізичних та хімічних параметрів оточуючого середовища. Чутливість таких сенсорів, що виготовляються, як правило, із кварцу, ніобату чи тантала-ту літію, залежить від зміни швидкості поверхневих хвиль під впливом зовнішніх факторів [1]. Іншим типом акустоелектронних сенсорів є сенсори на стоячих акустичних хвилях [2]. Принцип їх дії базується на залежності резонансної частоти структури від акустичних та електричних властивостей навколишнього середовища [3]. Завдяки великій чутливості до масових навантажень, вперше такі сенсори використовувались для контролю швидкості осаду металу у вакуумних установках [4]. Сенсори на стоячих хвилях слугують також датчиками тиску [5], а через непогану чутливість до наявної на поверхні резонатора рідини вони є кандидатом на створення біосенсорів [6].

П'єзоелектричні елементи, що працюють в режимі стоячих хвиль можуть також успішно використовуватись в структурах типу п'єзоелектрик — напівпровідник, де відбувається взаємодія носіїв заряду напівпровідника із зовнішніми п'єзоелектричними полями, створеними п'єзоелектричним перетворювачем [7]. Окрім джерела п'єзоелектричних полів, вказані резонатори можуть виконувати роль датчиків стану напівпровідникової плівки. Зміна параметрів напівпровідника (наприклад, концентрації носіїв заряду) призведе до зміни умов на границі поділу п'єзоелектрик — напівпровідник, що в свою чергу вплине на па-

раметри резонатора, тобто на його резонансні частоти та просторові розподіли п'єзоелектричних і пружних полів. Теоретичне дослідження впливу зміни граничних умов на розподіли п'єзоелектричних полів раніше було проведено лише для одновимірного випадку [8]. Для випадку тривимірних коливань резонатора розрахунок розподілів п'єзоелектричних та пружних полів є складною задачею, яку можна розв'язати лише наближеними методами (метод скінченних елементів [9], варіаційний метод Релея — Рітца [10]).

В даній роботі досліджувались акустоелектронні властивості пластин-резонаторів ніобату літію $Y - 128^\circ$ — повернутого зрізу. Проведено теоретичні розрахунки просторових розподілів пружних та п'єзоелектричних полів на резонансних частотах пластини. Експериментально проводились вимірювання зсуву резонансних частот пластини LiNbO_3 при зміні концентрації носіїв заряду в напівпровіднику, що розміщувався на її поверхні.

Зсув резонансних частот пластин реєструвався за допомогою вимірювання частотних залежностей модуля комплексної провідності структури п'єзоелектрик-напівпровідник (рис.1) при зміні концентрації носіїв заряду в напівпровідниковому шарі шляхом оптичного опромінення. В таблиці 1 наведено експериментально виміряні резонансні частоти структури п'єзоелектрик — напівпровідник без її освітлення та під впливом світлового опромінення.

З отриманих даних випливає, що акустоелектронні властивості пластин-резонаторів залежать від концентрації носіїв заряду в напів-

провіднику, зокрема, її зростання призводить до низькочастотного зсуву резонансних частот. Спостережуваний ефект можна пояснити взаємодією носіїв заряду з п'єзоелектричними полями, а саме — екрануванням вказаних полів. З огляду на це, пластина-резонатор ніобату літія в структурі п'єзоелектрик — напівпровідник, окрім джерела електричних полів, може виконувати роль сенсора, що реєструє зміни концентрації носіїв заряду в напівпровіднику.

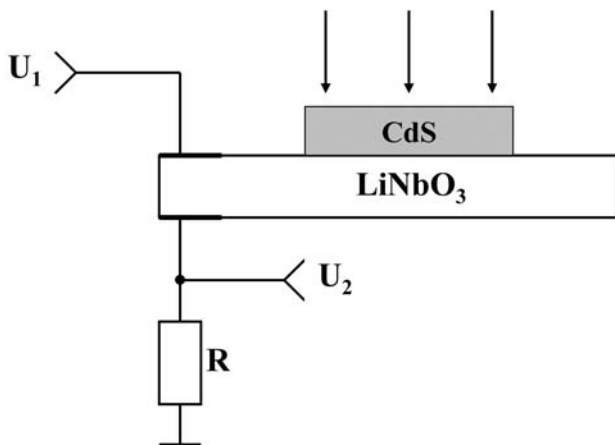
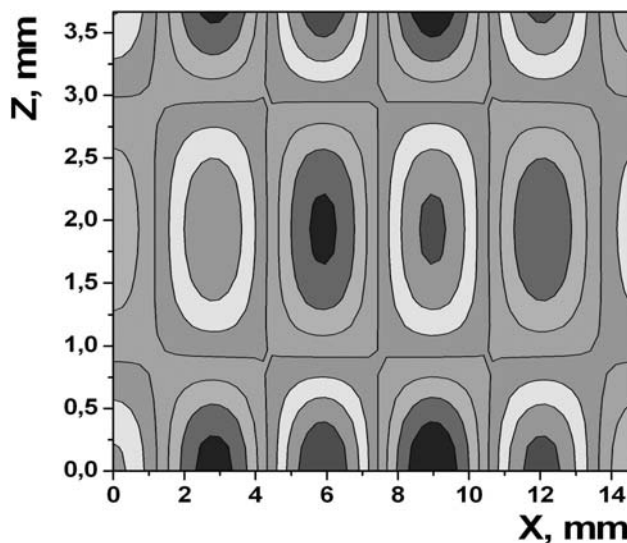


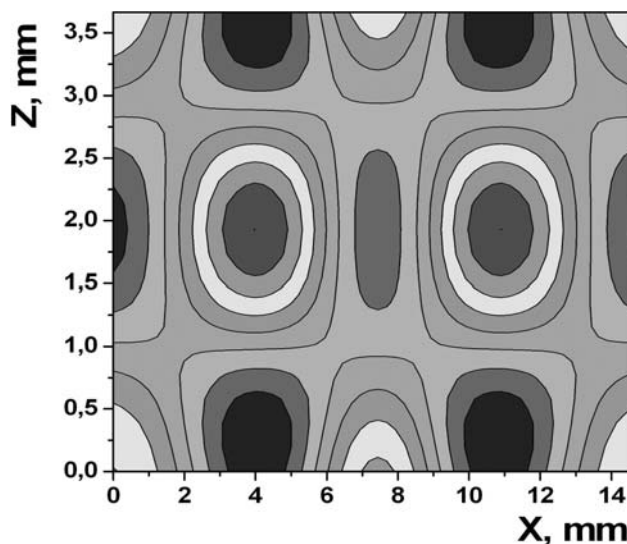
Рис. 1. Схема експерименту

Теоретично розраховувались розподіли пружних та п'єзоелектричних полів на базових гранях резонатора для окремих резонансних частот. В роботі використовувався відомий метод Релея — Рітца [10] із модифікованими базисними функціями [11], що враховують ефект проникнення п'єзоелектричних полів за межі резонатора. На рис. 2а — 2г наведено розраховані просторові розподіли компонентів п'єзоелектричного поля та п'єзоелектричного потенціалу на одній із базових XZ-граней резонатора ніобату літію $Y - 128^\circ$ — повернутого зрізу для однієї із резонансних частот. Темні ділянки на рисунках відповідають мінімальним значенням відповідних величин.

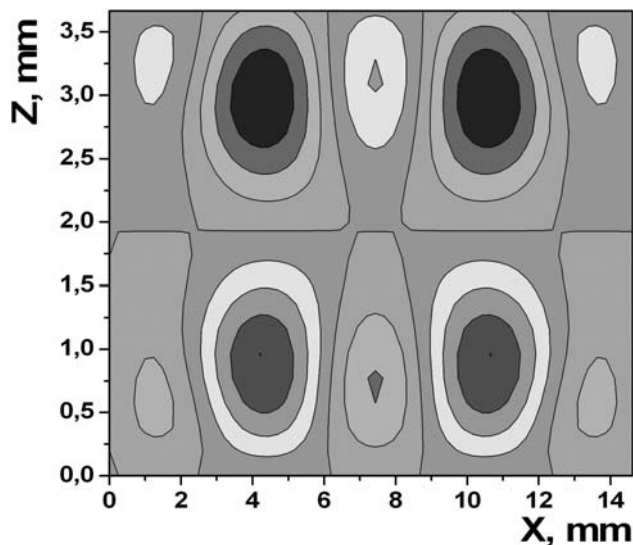
Розподіли пружних зміщень по поверхні п'єзоелектричного елемента вивчались на резонаторі ніобату літію X-зрізу. Теоретичні результати перевірялись за допомогою методу фігур Хладні, які являють собою скупчення часток порошку поблизу областей мінімальних зміщень. На рис.3 порівнюються результати розрахунків та експериментально отримана картина фігур Хладні. Наведені результати засвідчують непогане узгодження теоретичних та експериментальних даних.



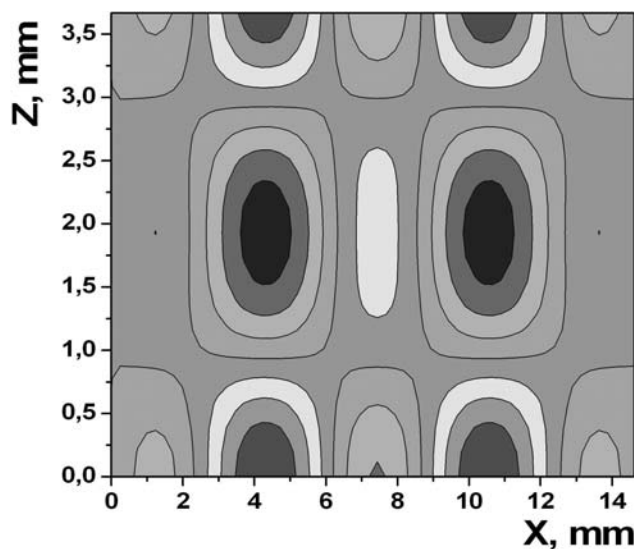
а)



б)

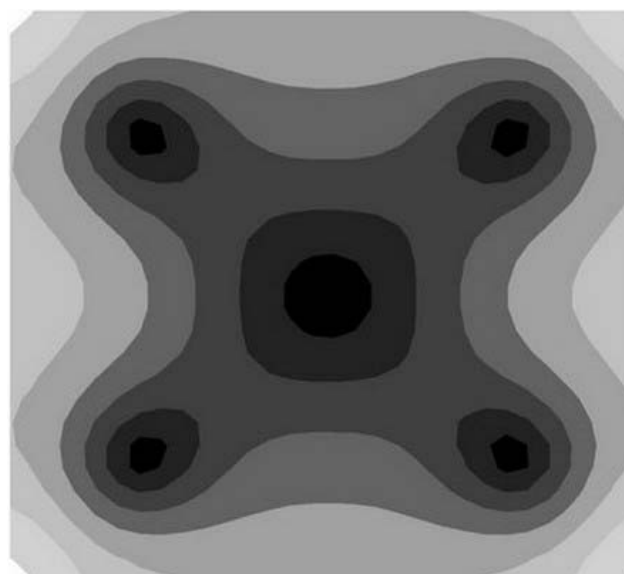


в)



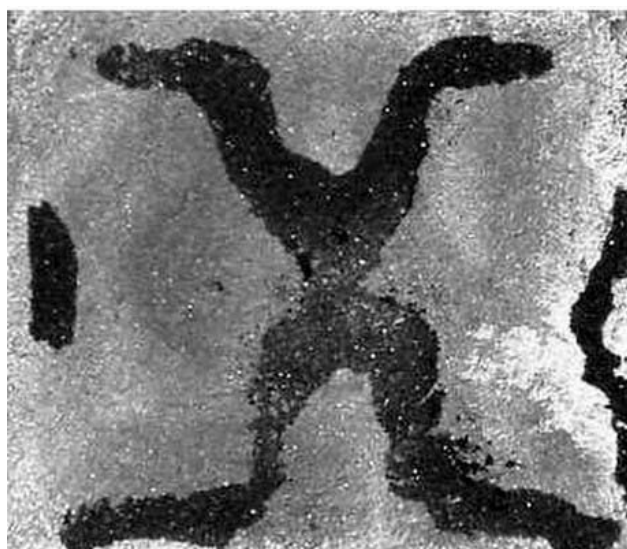
г)

Рис. 2. Теоретично розраховані розподіли компонент п'єзоелектричного поля (E_x , E_y , E_z — відповідно, рис. а — в) та п'єзоелектричного потенціалу (рис. г) на XZ-грані резонатора для резонансної частоти 708.32 кГц



б)

Рис. 3. Фігура Хладні (а) та розрахований поверхневий розподіл пружних зміщень (б) на поверхні резонатора LiNbO_3 X-зрізу



а)

Таким чином, в роботі запропоновано акустоелектронний сенсор типу п'єзоелектричний резонатор LiNbO_3 —напівпровідниковий шар. Експериментально зареєстрований зсув резонансних частот такої структури при її освітленні може бути покладений в основу датчика зміни концентрації носіїв заряду в напівпровіднику. За допомогою варіаційного методу Релея-Рітца проведено теоретичні розрахунки поверхневих розподілів пружних та п'єзоелектричних полів для деяких власних частот тривимірного п'єзоелектричного шару LiNbO_3 , який може бути використаний у такому сенсорі.

Резонансні частоти п'єзорезонатора при зміні стану напівпровідникової плівки

Таблиця 1

	f_{r1} , кГц	f_{r2} , кГц	f_{r3} , кГц	f_{r4} , кГц
Без освітлення	416.27	607.32	646.63	708.32
При освітленні	415.81	606.64	644.50	706.02

Список літератури

1. Caliendo C., Verona E., Anisimkin V. I., Acoustic wave sensors: design, sensing mechanisms and applications // *Smart Mater. Struct.* — 1997. — Vol. 6. — P. 647-657.
2. Benes E., Groschl M., Burger W., and Schmid M., Sensors based on piezoelectric resonators // *Sens. Actuators A.* — 1995. — Vol. 48. — P. 1–21.
3. Колесников А. Е., Акустические измерения. — Л.: Судостроение, 1983. — 256 с.
4. Wohltjen H. et al., Acoustic Wave Sensor — Theory, Design, and Physico-Chemical Applications. — San Diego: Academic Press, 1997. — 390 с.
5. Murali Krishna G., and Rajanna K., Tactile Sensor Based on Piezoelectric Resonance // *IEEE Sensors Journal.* — 2004. — Vol. 4. — No. 5. — P. 691-697.
6. Reindl L. et al., Passive Radio Requestable SAW Water Content Sensor // *Proc Ultrasonics Symposium.* — 1999. — Vol. 1. — P. 461-466.
7. Nadtochii A. B., Korotchenkov O. A., and Grimmeiss H. G., Acoustically pumped stimulated emission in GaAs/AlGaAs quantum wells // *Phys. Rev. B.* — 2003. — Vol. 67. — P. 125301-1 — 125301-5.
8. Бурлий П. В., Кучеров И.Я., Левченко А.А., Пьезоэлектрические поля в слоистых структурах полупроводник — пьезодиэлектрик — полупроводник // *УФЖ.* — 1988. — Т.33. — №1. — С. 144-151.
9. Lerch R., Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements // *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control.* — 1990. — Vol. 37. — № 3. — P. 233 — 247.
10. Holland R., Eer Nisse E., Variational evaluation of admittances of multielectroded three-dimensional piezoelectric structures // *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics.* — 1968. — Vol. 15. — P. 119 — 132.
11. Polovina O. I., Kurylyuk V. V., Korotchenkov O. A., Variational computation of a vibrating lithium niobate rectangular plate // *cond-mat/0604337- 2006.*