ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 7, № 3 (2003) с. 344–348

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 7, No. 3 (2003) p. 344–348

ФІЗИЧНІ ЯВИЩА У СТРУКТУРАХ НАПІВПРОВІДНИК–П'ЄЗОЕЛЕКТРИК ТА МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ НОВОГО КЛАСУ ПРИСТРОЇВ НА ЇХ ОСНОВІ

Я. Лепіх
Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65026, Україна
(Отримано 17 грудня 2002 р.)

На основі аналітичного огляду результатів досліджень різних авторів, і власних досліджень розглянуто фізичні явища які виникають у процесі ґенерації, поширення та детектування поверхневих акустичних хвиль у шаруватих структурах напівпровідник–п'єзоелектрик, а також ефекти взаємодії в них полів різної фізичної природи.

Зазначено, що досягнуті результати зумовлюють перспективу практичного застосування явищ для створення мікроелектронних функціонально інтеґрованих приладів.

Наведено досягнуті в лабораторних зразках параметри деяких класів пристроїв, які переконливо показують їх суттєву перевагу перед аналогами, побудованими на інших фізичних принципах, особливо у зв'язку з можливістю керованости характеристиками.

Ключові слова: напівпровідник, п'єзоелектрик, шаруваті структури, акустичні хвилі.

PACS number(s): 77.65.Dq

Різноманітні фізичні явища, які виникають у процесі ґенерації, поширення та детектування поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) у шаруватих структурах напівпровідник–п'єзоелектрик (Н–П), залишаються актуальним об'єктом наукових досліджень, оскільки вони є потужним джерелом багатьох методів створення високоефективних за виконуваними функціями й унікальними за технічними характеристиками мікроелектронних пристроїв. Особливістю пристроїв, у яких часто використовують ефекти взаємодії полів різної фізичної природи, є функціональна інтеґрованість та відносна легкість їх інтелектуалізації.

На сьогодні значна кількість фізичних явищ у шаруватих структурах не вивчена до рівня створення математичних моделей, але досягнуті за останні роки експериментальні результати зумовлюють перспективу їх практичного застосування в мікроелектронних приладах.

Основне значення для систематичних досліджень шаруватих структур типу Н–П мала теоретична робота Ю. В. Гуляєва і В. І. Пустовойта [1], у якій, крім фундаментального розгляду самих фізичних явищ, показано перспективу їх використання в такого класу структурах для обробки сиґналів. Роботи наступних років [2] підтвердили обґрунтованість передбаченої перспективи й підвели, зокрема, до ідеї створення квантового комп'ютера [3]. Базовою основою для подальших досліджень в цьому напрямку стала класична структура, яка зображена на рис. 1.

Така структура стала також конструктивною основою для багатьох акусто-, опто-, мікроелектронних пристроїв.

Великі потенційні можливості Н–П структур зумовлені численними комбінаціями, утворюваними різними за електрофізичними властивостями напівпровідниковими та п'єзоелектричними матеріялами. При цьому шаруваті Н–П структури можуть утворюватись як монолітними, наприклад методом епітаксії, так і з механічним контактом площин підкладок чи через повітряний (вакуумний) прошарок.

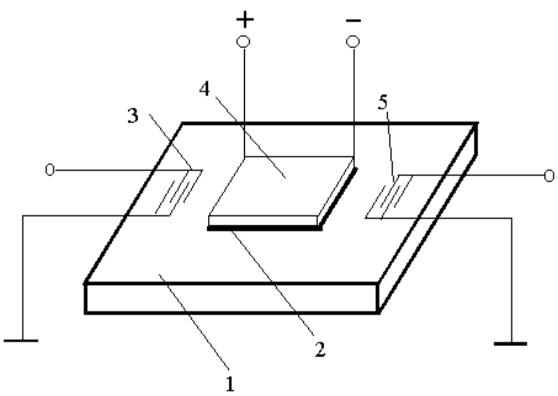

Рис. 1. Класична схема акустоелектронного пристрою на основі шаруватої структури Н–П. 1 — п'єзоелектрична підкладка-звукопровід, 2 — електрод, 3 — вхідний зустрічно-штировий перетворювач (ЗШП), 4 — напівпровідник, 5 — вихідний ЗШП.

З іншого боку, є багато напівпровідників, які одночасно мають властивості п'єзоефекту. Для найбільш досліджених з них у таблиці 1 наведено значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку.

Матеріял	ZnO	CdS	CdSe	Te	GaAs	InSb	GaP	SiC	AlN
Коефіцієнт електромеханічного зв'язку, K_p	0.28	0.15	0.12	0.35	0.02	0.04	0.11	0.03	0.20

Таблиця 1. Коефіцієнт електромеханічного зв'язку п'єзонапівпровідникових матеріялів.

Щобільше, деякі з них мають одночасно достатній для практичного використання рівень властивостей оптичних, фото-, тензо-, адсорбочутливостей, наприклад, CdS. Це дозволяє суттєво розширити використання Н–П структур або ж навіть одного матеріялу для створення інтеґрованих мікроелектронних елементів на основі взаємодії фізичних полів різної природи. Водночас з'являється можливість побудови функціональних пристроїв з керованими характеристиками, наприклад, зовнішнім електричним полем.

Вплив постійного поперечного електричного поля на параметри ПАХ у структурі ZnO/Si експериментально вивчали в [4].

У [5] експериментально досліджено стимульоване акустичним полем перенесення заряду у квантових ямах гетероструктур GaAs/AlGaAs на п'єзоелектричній пластині з $LiNbO_3$ 41° Y–X зрізу. Одержані результати можна використати при реалізації ідеї створення напівпровідникових лазерів з акустичною накачкою.

У статті [6] досліджено акустоінжекційний ефект у п'єзонапівпровідникових $p-n$ переходах, суть якого полягає в тому, що при поширенні акустичної хвилі через $p-n$ перехід, навантажений на зовнішній опір, виникає інжекція носіїв заряду в базові ділянки зразка. Установлений і вивчений ефект використано для створення нового типу керованого перетворювача сигналів — акустоінжекційного перетворювача.

Ефект інжекції носіїв заряду з контакту спостерігали в [7].

Теоретичні дослідження акусторезистивного ефекту в шаруватій структурі $LiNbO_3$ — плівка InSb проведено у [8]. Розраховано високочастотну провідність приповерхневого шару як функцію потенціялу на поверхні напівпровідника й відношення рівноважних концентрацій електронів і дірок та їх рухомість. Одержані результати дозволили пояснити ефект керованого акустоелектронного перетворення у структурах з поперечним дрейфом. Вивчений ефект у шаруватих структурах типу $LiNbO_3$ — плівка InSb послужив основою для створення високоефективних конвольверів, фазокрутильних та інших пристроїв.

Значну увагу дослідників привертають явища, які виникають у фоточутливих Н–П структурах [9–12]. Вони базуються на тому, що, внаслідок процесів фотозбудження вільних носіїв заряду, неоднорідного по простору, їх дифузії і дрейфу в електричному полі і захоплення на пастки, формується періодичний розподіл просторового заряду, який біжить синхронно з акустичною хвилею і повторює її форму. Ця хвиля електронного згустку супроводжується хвилею електричного поля. Таким чином, у фоточутливому напівпровідниковому матеріялі, навіть неп'єзоелектрику, але освітленому, виникають супутні акустичній хвилі, хвилі електричного поля й електронної провідности. На цій основі, при певних параметрах світлового потоку й зовнішнього електричного поля можна спостерігати ефекти ґенерації акусто-ЕРС і ґенерацію сиґналу згортки двох сиґналів.

Теоретично ефект впливу світла на характеристики хвилі з поперечно-горизонтальною поляризацією (SHo), що поширюється у структурі фоточутливий напівпровідник–п'єзоелектрик ($CdS/LiNbO_3$ Y–X зрізу), досліджено в [11]. Результати цих досліджень показали перспективу використання таких структур для розробки фотоприймачів і вимірювачів світловипромінювання.

У низці праць, зокрема в одній з перших робіт І. В. Островського [13], досліджувалось явище акустолюмінесценції у фоточутливих п'єзонапівпровідниках CdS, CdSe, ZnS та інших.

У [14] експериментально вивчено вплив додаткового постійного підсвічування на ґенерований модульованим лазерним освітленням акустичний сиґнал у напівпровідниках, які мають п'єзовластивості (CdS, ZnSe, GaAs). Показано, що в п'єзонапівпровідниках під дією модульованого лазерного освітлення, крім звичайної термопружної, ґенерується додаткова компонента фотоакустичного сиґналу, яка може переважати.

Ми досліджували оптоакустичну взаємодію й можливість керувати ґенерацією ПАХ у шаруватій структурі фоточутливий п'єзонапівпровідник–п'єзоелектрик.

Ґенерацію ПАХ здійснювали у структурі CdS/SiO_2 ST-зрізу шляхом послідовного перетворення у фоточутливому шарі п'єзонапівпровідника CdS модульованого світла у фотострум, а фотоструму в ПАХ за схемою, структурно зображено на рис. 2.

Модульований на робочій частоті пучок світла, випромінюваний джерелом 1 через фокусуючий пристрій 2, падає на фоточутливий п'єзонапівпровідник 5 через прозорий металевий електрод 6, який утворює із шаром 7 випрямний контакт, збіднений носіями заряду. По суті, елементи 5, 6 і 7 утворюють фотодіод з бар'єром Шотткі, який має контакт 8 з п'єзонапівпровідником 5. У фоточутливому п'єзонапівпровіднику 5 світло збуджує фотоелектрони й фотодірки. Коли енерґія фотонів напрямленого на напівпровідник світла перевищує ширину забороненої зони й висоту потенціяльного бар'єра металевого контакту, то в напівпровіднику здійснюється фотоемісія електронів з металу в напівпровідник [15]. Електричне поле в бар'єрі Шотткі, яке формується джерелом зміщення, розділяє фотоелектрони й фотодірки, ґенеровані в шарі, в результаті чого виникає фотострум, який протікає між омічним контактом 8 і електродом 6 через напівпровідник 5 і шар 7 і в зовнішній мережі 9. Частота фотоструму відповідає частоті модуляції світла, що падає на п'єзонапівпровідник, а фотострум збуджує ПАХ із частотою фотоструму, яка детектується зустрічно-штировим перетворювачем 3, розташованим на п'єзозвукопроводі SiO_2 4. Зміна інтенсивности освітлення фотодіода приводить до зміни товщини шару 7, збідненого носіями заряду, який є акустично активним шаром, і амплітуди ПАХ. Освітлення здійснювалось на довжині хвилі $\lambda = 0.53$ мкм. Пікова інтенсивність змінювалась у межах від 1 до 10^5 Вт/см^2. На основі такої оптоакустичної взаємодії можна побудувати генератори з керованою робочою частотою, які мають суттєві переваги перед аналогами, в тому числі й такими, у яких ґенерація ПАХ відбувається шляхом освітлення модульованим світлом окремо взятого (звичайного) фотодіода та подачі виробленого ним фотоструму на вхід акустоелектронного перетворювача. В останньому випадку керування параметрами пристрою неможливо досягти в принципі, оскільки зміна товщини шару, збідненого носіями заряду фотодіода, не викликає зміни товщини акустично активного шару перетворювача.

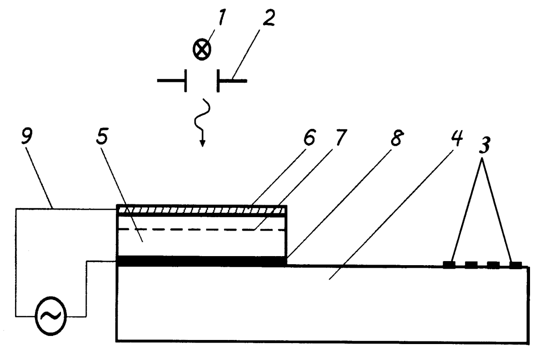

Рис. 2. Схема керування ґенерацією ПАХ на основі оптоакустичної взаємодії.

Ми дослідили також фототермоакустичний ефект у структурі фоточутливий напівпровідник–п'єзоелектрик, який був використаний для створення сенсора ІЧ-випромінювання [16]. Фізичний механізм ефекту полягає в тому, що при певному співвідношенні оптичних і температурних властивостей напівпровідника й п'єзоелектрика в єдиній структурі при ІЧ-освітленні в заданій ділянці довжин хвиль λ досягається контрольована зміна швидкости поширення ПАХ. Структурно сенсор ІЧ-випромінювання показано на рис. 3. Він складається з п'єзоелектричної пластини $LiNbO_3$, повернутого під кутом 128° YX-зрізу 1, який є прозорим до ІЧ-випромінювання 2 в діяпазоні довжин хвиль $\lambda = 0.4 \div 5.0$ мкм, і має великий температурний коефіцієнт частоти, що дорівнює 69×10^{-6} Гц/°C. На поверхні $LiNbO_3$ розташована резонансна зустрічно-штирова структура 3, а на ній — фоточутливий напівпровідниковий шар InSb 4. Залежно від робочої частоти топологія резонансної структури й геометричні параметри фоточутливого шару можуть мати різні значення. При цьому шар InSb у вибраному діяпазоні λ має максимальне поглинання ІЧ-променів. На рис. 3, крім того, показані типові елементи: 5 — підсилювач, 6 — пристрій обробки сиґналу.

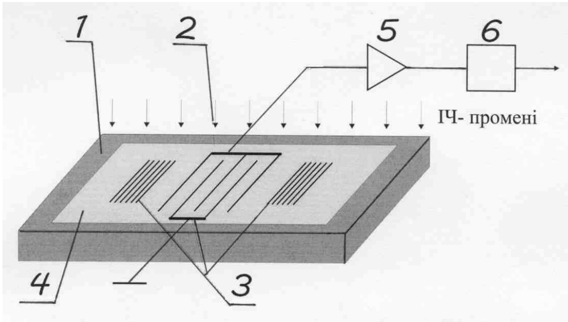

Рис. 3. Структура сенсора ІЧ-випромінювання.

За відсутности ІЧ-випромінювання резонатор має резонансну частоту, задану електрофізичними властивостями $LiNbO_3$, конструктивними розмірами його елементів і температурою навколишнього середовища. При включенні ІЧ-джерела шар InSb поглинає ІЧ-промені і розігрівається разом з поверхневим шаром $LiNbO_3$, міняючи в ньому швидкість ПАХ, а значить і центральну частоту резонатора. Оскільки енергія ПАХ Релея зосереджена в тонкому, рівному приблизно довжині акустичної хвилі, шарі, то це забезпечує високу чутливість і малу інерційність сенсора. У свою чергу частотний вид вихідного сиґналу сенсора забезпечує йому відносно легку інтелектуалізацію. Графік залежности резонансної частоти ІЧ-сенсора від температури показано на рис. 4.

Точніше кажучи, в такій структурі спостерігаємо подвійну дію температури на умови поширення ПАХ — лінійне розширення матеріялу звукопроводу і зміну швидкости ПАХ через зміну акустичного імпедансу. В [17] проаналізовано сумарний вплив цих ефектів і одержано співвідношення для зміни частоти:

$$\Delta f \approx \frac{V_0 V_1}{V_0^2 + V_1^2} \left(\gamma_{\text{вх}} - \gamma_{\text{вих}}\right) \Delta T,$$

де V_0 — початкова швидкість поширення ПАХ;
V_1 — зміна швидкости ПАХ унаслідок температурної дії;

$\gamma_{\text{вх}}, \gamma_{\text{вих}}$ — температурні коефіцієнти до і після дії температури відповідно;
ΔT — нарощення температури від її значення, що відповідає V_0.

Однак для одновходового ПАХ-резонатора, який є в нашому випадку, розширенням звукопроводу можна знехтувати.

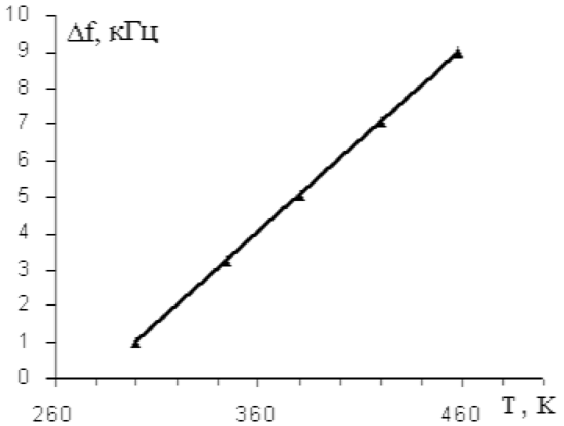

Рис. 4. Графік залежности резонансної частоти сенсора ІЧ-випромінювання від температури.

Чутливість сенсора, побудованого на цьому принципі, становить 5142 Гц/°С, верхня границя вимірювання обмежується головно температурними характеристиками матеріялів. Графік залежности резонансної частоти ІЧ-сенсора від температури наведено на рис. 4.

Використання фототермоакустичного ефекту для створення подібних пристроїв є досить ефективним ще й тому, що дає змогу розширити цей клас сенсорів шляхом комбінації компонентів шаруватої Н–П-структури. Підбираючи напівпровідникові й п'єзоелектричні матеріяли з відповідними електрофізичними параметрами і властивостями фоточутливости, можна створити сенсори із заданими характеристиками по спектральному діяпазону. Можна також створити структуру з кількох шарів фоточутливих напівпровідників з різною шириною забороненої зони. При цьому, однак, слід мати на увазі обмеження акустичного плану, щоб не створити умов сильного пригнічення корисного сиґналу ПАХ або трансформації ПАХ Релея в інші типи хвиль, які можуть бути, наприклад, дисперсійними.

Розширити спектральну характеристику напівпровідника шаруватої структури в довгохвильову ділянку можна також шляхом посилення механізму примісного поглинання ІЧ-променів.

Описані фізичні явища в структурах Н–П не вичерпують перелік. Вони показують тільки частину широти перспективи, пов'язаної з їх дослідженнями та створенням високоефективних функціональних мікроелектронних пристроїв для різних напрямків науки, приладобудування та інших галузей промисловости.

[1] Ю. В. Гуляев, В. И. Пустовойт, Журн. эксп. теор. физ. **47**, 6, 2251 (1964).
[2] C. Campbel, *Surface Acoustic Wave Devices and Their Signal Processing Aplication Academic* (Boston, 1989), p. 475.
[3] C. H. Barnes, I. M. Shilton, A. M. Robonson, Phys. Rev. B **62**, 8410 (2002).
[4] S. Urable, IEEE Trans. SU-29, 5, 255 (1982).
[5] А. М. Горб, А. Б. Надточій, О. І. Половина, О. О. Коротченков, *1-а Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-1. Тези доповідей, Т. 1* (Астропринт, Одеса, 2002).
[6] Ю. В. Гуляев, Г. Д. Мансфельд, Г. А. Орлова *и др.*, Письма журн. тех. физ. **7**, 6, 339 (1981).
[7] В. С. Гаевский, И. Я. Кучеров, В. М. Перга, *Материалы XII Всесоюзной конференции по акустоелектронике и квантовой акустике, Ч.1* (Саратов, 1983), с. 77.
[8] Г. Д. Мансфельд, Ш. Т. Мевлют, В. Н. Ношнрняк *и др.*, *XIV Всесоюзная конференция по акустоэлектронике и физической акустике твердого тела. Тезисы докладов.* 1, 104 (1989).
[9] A. Mandelis, E. Siu, Phys. Rev. B **34**, 7209 (1986).
[10] И. С. Гудзинская, П. А. Пятаков, Акустический журн. **35**, 4, 616 (1989).
[11] И. С. Гудзинская, П. А. Пятаков, А. А. Чабан, Акустический журн. **39**, 3, 467 (1993).
[12] И. А. Бродина, И. Е. Кузнецова, Б. Д. Зайцев *и др.*, Письма журн. тех. физ. **28**, 1, 23-29 (2002).
[13] И. В. Островский, Письма журн. тех. физ. **34**, 8, 463 (1981).
[14] Г. И. Булах, Р. М. Бурбело, О. В. Волчанский, И. Я. Кучеров, Укр. фіз. журн. **37**, 411 (1992).
[15] М. Г. Тарнавський, В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Вісн. Вінницького політехнічного ін-ту **1**, 110 (1998).
[16] Ya. Lepikh, *Proc. Internat. confer., Infrared Sensors & Systems*, (Erfurt. Germany. 2002), p. 179.
[17] P. C. Meyer, M. B. Shulz, Electron. Lett. **9**, 523 (1993).

THE PHYSICAL PHENOMENA IN SEMICONDUCTOR–PIEZOELECTRIC STRUCTURES AND THE OPPORTUNITY OF NEW CLASS DEVICES CREATION ON THEIR BASIS

Ya. I. Lepikh
The Odessa National Mechnikov University,
2 Dvorianska Str., Odessa, 65026, Ukraine

In the article on the basis of the analytical review the results of different authors and our own research the physical phenomena are considered which arise during surface acoustic waves (SAW) generation, distribution and detecting in semiconductor-piezoelectric (S-P) layered structures and effects of varied physical nature fields interaction in them. Such, for example, as transport of charge in quantum heterojunction wells under acoustic field influence, charge carriers autoinjection in p-n junction and from contact, acoustoluminescence and the other. The mechanisms of the physical phenomena are considered also which arise in photo sensitive structures S-P. Owing to the processes of free charge carriers photoexcitation, their diffusion and drift in the electrical field, the capture on traps periodic distribution of a space charge is formed. At certain parameters of a light flow and external electrical field it is possible to reach acousto-EMF generation and signal of convolution of two signals. The optoacoustic interaction and an opportunity of SAW generation control in photosensitive piezosemiconductor-piezoelectric structure with the formed Shottky barrier are considered in detail. As a result of an irradiation such a S-P structure by the modulated light the electron photoemission is realized, the photocurrent arises with the frequency which corresponds to the appropriate modulation frequency that in turn excite SAW with the same frequency. The phototermoacoustic effect in IR range in a structure of photosensitive semiconductor-piezoelectric with the system SAW converters is described too. The physical mechanism of the effect is that at certain ratio of optical and temperature layered structure elements properties at IR irradiation the adequate change SAW speed distribution is achieved. It is essential that the spectral characteristic of such a structure can be formed during its synthesis. It is pointed out that the results are prospective for the of creation of the microelectronic functionally integrated devices. The parameters, achieved in laboratory samples, of some classes of devices show their essential advantage in comparison with the analogues constructed on different physical principles, particularly in connection with an opportunity to control the characteristics.