

Керована смугопропускна лінія передачі на основі одновісних монокристалічних гексаферитів в доменній області

А.Л. Нікитенко, В.І. Костенко, Л.В. Чевнюк, В.І. Григорук, В.Ф. Романюк

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64, 01033 Київ, Україна

(Одержано 22.11.2017, опубліковано online 28.04.2017)

У даній роботі запропоновано смугопропускну лінію передачі на основі одновісних монокристалічних гексаферитів в доменній області. Цю лінію можна використовувати для експериментального дослідження збудження і розповсюдження магнітостатичних хвиль міліметрового діапазону в одновісних монокристалічних гексаферитах, а також створення керованих смугопропускних фільтрів і ліній затримки. На її основі вперше створено макет керованого смугопропускного фільтра з платівкою монокристалічного бар'євого гексафериту в доменній області при доменній структурі певного типу. Представлено результати експериментальних досліджень умов збудження і поширення магнітостатичних хвиль в платівці монокристалічного бар'євого гексафериту, яка є основним функціональним елементом запропонованого смугопропускного фільтра. З'ясовано, що визначальним фактором при передачі сигналу в створеному макеті є втрати потужності магнітостатичних хвиль при їх поширенні. Показано, що існує кореляція між інтенсивністю, шириною смуги магнітостатичних резонансів і ефективністю передачі магнітостатичних хвиль в доменній області.

Ключові слова: Монокристал, Бар'євий гексаферит, Магнітостатичні хвилі, Феромагнітний резонанс, Доменна структура, Смугопропускний фільтр.

DOI: 10.21272/jnep.9(2).02010

PACS numbers: 41.20.Jb, 84.40. – x

1. ВСТУП

Міліметровий діапазон (мм-діапазон) радіохвиль, в основному використовуваний в оборонній галузі та радіоастрономії, сьогодні викликає зацікавленість до його цивільного застосування, включаючи зв'язок між супутниками, короткостільникові хмарні мережі, високошвидкісні системи бездротового зв'язку, радары для транспортних засобів, дистанційне зондування, медична візуалізація та діагностика [1-3]. В свою чергу, класичні магнітні матеріали, наприклад залізо-ітрієвий гранат (ЗІГ), потребують прикладення значних зовнішніх полів намагнічення H_0 при їх використанні в мм-діапазоні. Потенційно можливим рішенням проблеми мінітюаризації і енергоефективності приладів мм-діапазону є використання монокристалічних гексаферитів М-типу, яким притаманні великі поля кристаліграфічної анізотропії (H_a). Так для $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ маємо $H_a \approx 17$ кЕ, що робить можливим його використання для побудови пристроїв мм-діапазону у відсутності H_0 , або при полях, менших від поля насичення H_{sat} [4].

Одним з основних функціональних елементів надвисокочастотних (НВЧ) приладів, таких як приймально-передавальні системи, а також пристроїв обробки сигналу є фільтри. Особливий інтерес викликає можливість ефективного керування характеристиками фільтра при забезпеченні належного рівня енергоефективності і масогабаритних показників. В роботі [5] представлений теоретичний розрахунок параметрів смугопропускного фільтра, на основі діелектричного резонатора з планарною структурою немагнітний діелектрик/ епітаксійна плівка ЗІГ/ п'єзоелектрик. В даному фільтрі можлива перебудова робочих характеристик як магнітним, так і електричним полем в діапазоні 7,5-9,5 ГГц і забезпечення модуля коефіцієнта передачі S_{21} порядку – 9 дБ. Смугопропускний фільтр побудований на схрещених щільних лініях з гексаферитовими сферами пред-

ставлений в роботі [6]. За рахунок зміни поля H_0 можлива перебудова робочої частоти в широкому діапазоні (39-68 ГГц) при $S_{21} - (5,3-7)$ дБ і типовою шириною смуги пропускання $2\Delta f$ на рівні 3 дБ від максимуму в межах 300-400 МГц. Обидва представлені фільтри працюють в насиченні, тобто при полях H_0 більших 3,5 кЕ. Цікавий результат представлений у роботі [7], де запропоновані і досліджені планарні смугопропускні фільтри, що працюють в діапазоні 18-36 ГГц і базуються на діелектричному резонансі в полікристалічному NiFe_2O_4 . Дані фільтри керуються полями H_0 0-2 кЕ, S_{21} змінюється в межах – (2-5) дБ і $2\Delta f \approx 500$ МГц. Разом з тим, в роботі [8] вперше експериментально продемонстровано у безпольовому режимі роботу макета смугозагороджувального фільтра мм-діапазону на основі каналючого діелектричного хвилеводу з монокристалічною платівкою $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, з попередньо створеною в останньому регулярною доменною структурою (ДС).

Таким чином, виникає потреба в створенні смугопропускного фільтра мм-діапазону, що поєднав би в собі такі характеристики як ефективна перебудова робочих характеристик, енергоефективність, вузька ширина смуги пропускання і низькі втрати потужності корисного сигналу. Дана експериментальна робота присвячена створенню і дослідженню характеристик лабораторного зразка смугопропускної лінії передачі, що може бути використана для побудови такого фільтра на основі пластинки $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ в доменній області з попередньо сформованою ДС певного типу.

2. МОДЕЛЬ СМУГОПРОПУСКНОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ

Конструкція запропонованої смугопропускної лінії передачі схематично представлена на рисунку 1 і є зв'язаними хвилеводами 6-мм стандарту 1. Зв'язок між ними забезпечується платівкою одновісного монокристалічного гексафериту 2, вміщеною в закритичну щі-

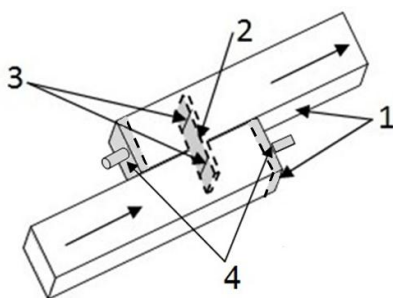


Рис. 1 – Схематична модель смугопротискувальної лінії передачі

ліну на бокових стінках хвилеводів. Легка вісь гексаферитової платівки орієнтована нормально до її площини. Для збудження магнітостатичних хвиль (МСХ) у вхідній хвилевідній секції і зворотнього перетворення їх енергії в електромагнітну хвилю у вихідній, до поверхні гексаферитової платівки перпендикулярно довшій її стороні приклеєні антени 3. Короткозамикачі хвилевідних секцій 4 закріплені на гвинтовій системі, що дозволяє змінювати їх положення вздовж хвилевідних секцій. Це дає змогу підстроювати їх положення таким чином, щоб пучність електричної компоненти $|E|$ стоячої хвилі в хвилевідних секціях лежала в площині гексаферитової платівки. Таким чином досягаються оптимальні умови для збудження МСХ в платівці гексафериту.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Експериментальні дослідження смугопротискувального фільтра, що являє собою лінію передачі (див. рис. 1), внесена в постійне магнітне поле H_0 , проводились методом надвисокочастотної (НВЧ) спектроскопії з використанням скалярного панорамного вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) та ослаблення у складі індикатора Я2Р-67 та генератора Р2-68, а також поляризаційного атенюатора Д5-13. Робочий частотний діапазон використовуваного панорамного вимірювача становить 36-54 ГГц. Магнітне поле H_0 (до 21 кЕ) створювалось за допомогою постійного електромагніту та вимірювалось вимірювачем магнітної індукції Ш1-8. Певний тип ДС отримувался з використанням методу перемагнічування фериту постійним магнітним полем. Якість отриманої ДС контролювалася шляхом візуального спостереження з використанням комп'ютеризованого інфрачервоного поляризаційного мікроскопа МІК-4.

Дослідження характеристик запропонованого фільтра проводилось з використанням платівки $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ розмірами $2,25 \times 7,85 \text{ мм}^2$ і товщиною фериту $t_f = 27 \text{ мкм}$, яка для міцності конструкції приклеєна до тонкої кварцової підкладки ($t_s = 110 \text{ мкм}$). В гексафериті створена смугова доменна структура (СДС) в якій доменна межа (ДМ) орієнтована перпендикулярно змінному магнітному полю хвилі h (ДМ $\perp h$). СДС була отримана при куті $\varphi = 15^\circ$ між полем H_0 і поверхнею платівки гексафериту в процесі перемагнічування. Віддаль між золотими антенами, приклеєними до поверхні гексафериту, становила 6 мм, їх діаметр складав 40 мкм.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) коефіцієнта S_{21} досліджуваного фільтра в околі смуги пропускання при відсутності H_0 представлена на рисунку 2а, візуалізована ДС – на рисунку 2б. Варто зазначити, що поза смугою пропускання фільтра сигнал знаходиться на рівні шумів ($\gg 60 \text{ дБ}$).

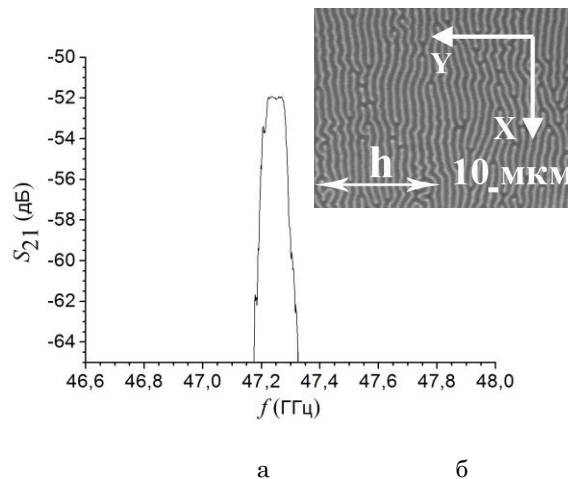


Рис. 2 – Модуль коефіцієнта передачі S_{21} досліджуваного смугопротискувального фільтра у відсутності поля H_0 при попередньо створеній СДС у гексафериті (а), візуалізована СДС при $H_0 = 0 \text{ Е}$ (б)

У відсутності поля H_0 центральна частота у смугі пропускання фільтра становить $f_r = 47,24 \text{ ГГц}$, $S_{21} \approx 52 \text{ дБ}$ і $2\Delta f = 80 \text{ МГц}$ (див. рис. 2а). Як видно з рисунку 3, зі зростанням H_0 смуга пропускання фільтра перебудовується в бік нижчих частот. Ця залежність була виміряна для двох різних напрямків прикладеного поля H_0 : вздовж поширення МСХ (H_{\parallel}) і перпендикулярно до них (H_{\perp}). Розрахунок даної частотно-польової залежності в магнітостатичному наближенні проведено за наступною формулою [9]

$$\omega = \gamma H_a \sqrt{\left((1-\rho)^2 - \frac{1-2r}{1-\rho} \left(\frac{H_0}{H_a} \right)^2 \right)} \quad (1)$$

де ρ і r визначаються за формулами

$$\rho = N_z M / H_a, \quad r = 2\pi M / H_a,$$

$$N_z = \frac{32}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} m^{-2} \frac{1 - \exp(-kt)}{kt},$$

$$kt = 2\pi m / \nu, \quad \nu = l / t,$$

де l – період ДС, t – товщина гексаферитового шару, M – намагніченість.

Як можна побачити з рисунку 3, зі зміною H_0 в межах 0-1500 Е частота f_r перебудовується на 110 МГц при H_{\parallel} і на 160 МГц при H_{\perp} .

Із залежності, представленої на рисунку 4 бачимо, що зі збільшенням поля H_0 до величини 625 Е коефіцієнт $S_{21} \approx -52 \text{ дБ}$ залишається незмінним. Однак, при подальшому збільшенні H_0 втрати значно зростають. У той же час, як видно з рисунку 5, збільшення H_0 призводить до зменшення $2\Delta f$ аж до 34 МГц при обох напрямках H_0 .

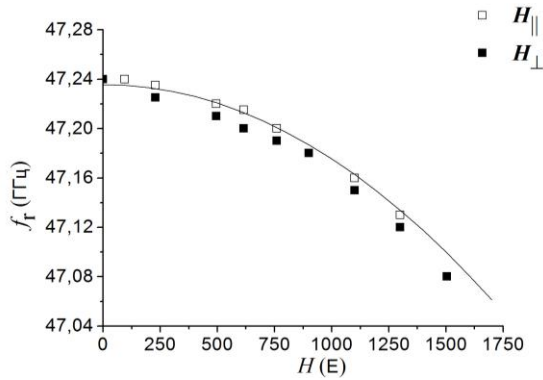


Рис. 3 – Залежність центральної частоти у смузі пропускання фільтра від величини зовнішнього магнітного поля при двох його напрямках: вздовж поширення МСХ (H_{\parallel}) і перпендикулярно до них (H_{\perp}). Точки відповідають експериментальним даним, суцільна лінія – результат розрахунку

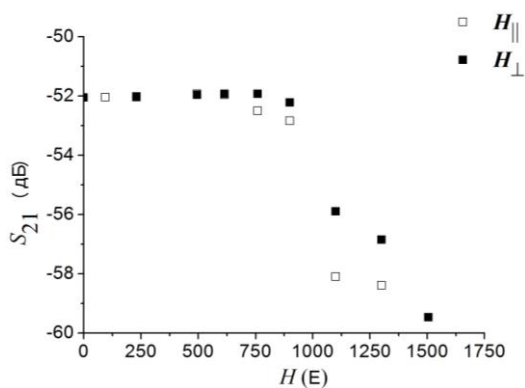


Рис. 4 – Експериментальна залежність коефіцієнта передачі S_{21} від зовнішнього магнітного поля, прикладеного в двох різних напрямках: вздовж поширення МСХ (H_{\parallel}) і перпендикулярно до них (H_{\perp})

Підсумовуючи характеристики, отримані при полях H_0 до 1500 Е, маємо величини перебудови f_r в залежності від орієнтації поля H_0 – 110 МГц і 160 МГц, $2\Delta f$ 33–80 МГц і S_{21} – (52–59) дБ. Таким чином, незважаючи на цілком прийнятний діапазон перебудови f_r і величину $2\Delta f$ досліджуваній фільтр має недопустимо великі втрати потужності сигналу в смузі пропускання.

З міркувань ефективності збудження і прийому МСХ найбільш сприятливим положенням для обох антен є центр хвильової секції, адже саме в цьому місці максимальний модуль електричної компоненти електромагнітної хвилі $|E|$ у вхідній секції, а також забезпечується максимальний зв'язок з хвильовою системою у вихідній. В той же час, одним із визначальних факторів при поширенні МСХ в феритах є рівень затухання сигналу, який для монокристалічного $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ є досить значним. На рисунку 6 представлений коефіцієнт S_{21} досліджуваного фільтра в залежності від відстані між стінкою вихідної хвильової секції до приймальної антени (d) при $H_0=0$ Е. Таким чином, як показано експериментально (див. рис. 6),

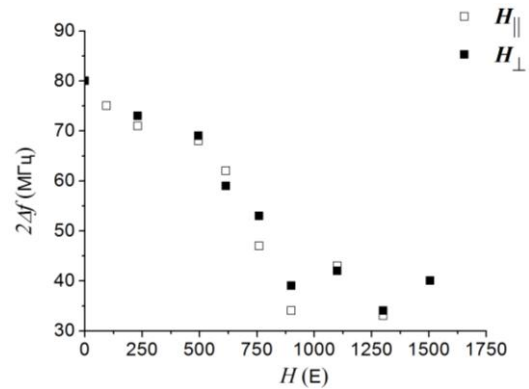


Рис. 5 – Те саме що і на рисунку 4 для величини $2\Delta f$

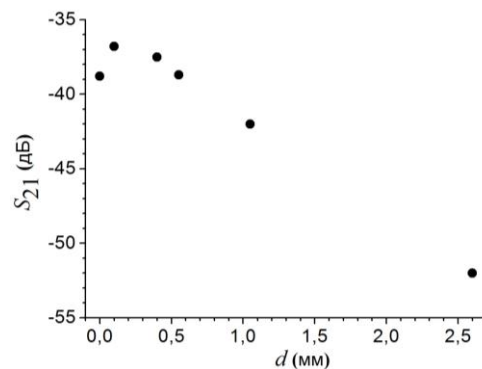


Рис. 6 – Експериментальна залежність коефіцієнта передачі S_{21} від відстані між стінкою вихідної хвильової секції до приймальної антени при $H_0=0$ Е

при відстанях d більших від 0,1 мм визначальним є фактор затухання МСХ при їх поширенні в платівці $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$.

При найбільш оптимальному з експериментально досліджених положень приймальної антени ($d=0,1$ мм) проведено експериментальне дослідження величини S_{21} при різних типах створеної ДС. Розглянуті смугова ДС (СДС) для випадків $\text{DM}\perp h$ і $\text{DM}\parallel h$, а також циліндрична ДС (ЦДС), яка була отримана при куті $\varphi=2^{\circ}22'$. В Таблиці 1 представлена інформація про частоти низькочастотної і високочастотної мод магнітостатичних коливань (МСК) F_1 і F_2 відповідно, ширину смуги найбільш інтенсивної моди ($2\Delta f$) і величини модуля коефіцієнта відбиття S_{11}^1 і S_{11}^2 на відповідних частотах мод платівки монокристалічного $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, при її розташуванні на короткозамикачі хвильоводу для різних типів ДС, а також коефіцієнт S_{21} для фільтра при відповідній ДС у відсутності поля H_0 .

Найменші втрати $S_{21}=-36,8$ дБ при поширенні МСХ зафіксовано для випадку СДС ($\text{DM}\perp h$), в той же час для випадку СДС ($\text{DM}\parallel h$) корисний сигнал на виході фільтра був відсутнім. Як можна побачити, втрати тим менші, чим більшим є S_{11} і мінімальна $2\Delta f$.

Аналогічні дослідження при різних типах ДС, проведені для платівки $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ розмірами

Таблиця 1 – Вплив типу ДС на характеристики спектра МСК та модуль коефіцієнта передачі досліджуваного фільтра

Тип ДС	F_1 , ГГц	S_{11}^1 , Дб	F_2 , ГГц	S_{11}^2 , Дб	$2\Delta f$, МГц	S_{21} , Дб
СДС (ДМ⊥h)	47,23	12,7	–	–	80,1	36,8
СДС (ДМ h)	47,34	2,24	53,51	4,62	502,6	–
ЦДС	47,35	7,3	49,73	2,52	99,9	43,3

1,9 × 3,95 мм² з $t_f = 31$ мкм і $t_s = 129$ мкм, показали, що найменші втрати ($S_{21} \approx -37$ дБ) спостерігаються у випадку ЦДС. Характерними особливостями спектрів МСК платівок гексафериту при ДС, за якої спостерігаються найменші втрати є найвужча ширина смуги ($2\Delta f$) і найбільша інтенсивність магнітостатичних резонансів, порівняно з резонансами при інших ДС. Разом з тим, величина S_{21} відрізняється більш ніж на порядок для однієї і тієї ж платівки гексафериту при різних типах ДС. Слід зазначити, що в режимі насичення ширина смуги ФМР однакова для всіх платівок ВаFe₁₂O₁₉, однак, стає відмінною при утворенні ДС і залежить від її якості. Відтак, набуває важливості регуляризація доменної структури.

4. ВИСНОВКИ

Запропоновано смугопропускну лінію передачі на

одновісних монокристалічних гексаферитах в доменній області. На її основі вперше створено макет керованого смугопропускну фільтра з платівкою ВаFe₁₂O₁₉ при доменній структурі певного типу. Експериментально показано, що в досліджуваному фільтрі при конкуренції оптимальних умов збудження сигналу і втрат при його передачі визначальним є саме величина втрат при поширенні МСХ в гексафериті. Так, при розташуванні приймальної антени на відстані 0,1 мм від стінки вихідної хвилевідної секції вдалося отримати найкращий коефіцієнт передачі $S_{21} = 36,8$ дБ. Показано, що мінімальні втрати вдається досягти при поєднанні двох умов — максимальній інтенсивності і мінімальній ширині смуги магнітостатичних резонансів в платівці гексафериту. При цьому коефіцієнт S_{21} може змінюватись більш ніж на порядок в залежності від створеної ДС для одного і того ж зразка.

Управляемая полосно-пропускающая линия передачи на основе одноосных монокристаллических гексаферритов в доменной области

А.Л. Никитенко, В.И. Костенко, Л.В. Чевнюк, В.И. Григорук, В.Ф. Романюк

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 64, 01033 Киев, Украина

В данной работе предложено полосно-пропускающую линию передачи на основе одноосных монокристаллических гексаферритов в доменной области. Эту линию можно использовать для экспериментального исследования возбуждения и распространения магнитостатических волн миллиметрового диапазона в одноосных монокристаллических гексаферритах, а также построения полосно-пропускающих фильтров и линий задержки. На ее основе впервые построено макет управляемого полосно-пропускающего фильтра с пластинкой монокристаллического бариевого гексаферрита в доменной области при доменной структуре определенного типа. Представлено результаты экспериментальных исследований условий возбуждения и распространения магнитостатических волн в пластинке монокристаллического бариевого гексаферрита, которая является основным функциональным элементом предложенного полосно-пропускающего фильтра. Установлено, что ключевым фактором при передаче сигнала в построенном макете являются потери мощности магнитостатических волн при их распространении. Показано, что существует корреляция между интенсивностью, шириной полосы магнитостатических резонансов и эффективностью передачи магнитостатических волн в доменной области.

Ключевые слова: Монокристалл, Бариевый гексаферрит, Магнитостатические волны, Ферромагнитный резонанс, Доменная структура, Полосопропускающий фильтр.

Tunable Bandpass Transmission Line Based on Uniaxial Single-Crystal Hexaferrites in Multidomain Area

A.L. Nikytenko, V.I. Kostenko, L.V. Chevnyuk, V.I. Grygoruk, V.F. Romaniuk

Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64, Volodymyrska Str., 01033 Kyiv, Ukraine

Bandpass transmission line on the basis of uniaxial single-crystal hexaferrites in multidomain area has been proposed in this paper. This line can be used for experimental investigation of excitation and propagation of magnetostatic waves within millimeter wave range in uniaxial single-crystal hexaferrites as well as for designing of bandpass filters and delay lines. Based on it model of tunable bandpass filter with platelet of single-crystal barium hexaferrite in multidomain area with domain structure of some definite type has been designed for the first time. The work presents results of experimental investigations into conditions of excitation and propagation of magnetostatic waves in single-crystal platelet of barium hexaferrite which is the main functional element of the proposed bandpass filter. It has been found out that

power attenuation of magnetostatic waves during their propagation is the key factor of signal transmission in the investigated model. It is shown that there is a correlation between intensity, bandwidth of magnetostatic resonances and efficiency of magnetostatic waves transmission in the multidomain area.

Keywords: Single-crystal, Barium hexaferrite, Magnetostatic waves, Ferromagnetic resonance, Domain structure, Bandpass filter.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. T.S. Rappaport, G.R. Maccartney, M.K. Samimi, S. Sun, *IEEE T. Commun.* **63** No 9, 3029 (2015).
2. V.M. Vyshnevskii, S.A. Frolov, *T-Comm.* **5** (2013).
3. Z. Baghchehsarei, J. Oberhammer, *IEEE T. Microwave Theory Tech.* **61** No 12, (2013).
4. L. Malkinski, *Advanced Magnetic Materials* (2012).
5. Н.Н. Мовчан, М.А. Попов, *Вісник НТУ "Київський політехнічний інститут"* **62**, 40 (2015) (N.N. Movchan, M.A. Popov, *Visnyk NTU "Kyivskyy politekhnichnyy instytut"* **62**, 40 (2015)).
6. M. Sterns, R. Rehner, D. Schneiderbanger, S. Martius, L.P. Schmidt, *Int. Microwave Symp. Dig. (IEEE MTT-S)*, **637** (2009).
7. M.A. Popov, D.V.B. Murthy, I.V. Zavislyak, G. Srinivasan, *Electron. Lett.* **3** No2, 98 (2012).
8. A.M. Sorochak, V.I. Kostenko, L.V. Chevnyuk, T.G. Chamor, *Kharkiv: IEEE Conference Publications* **277** (2013).
9. V.I. Kostenko, M.A. Sigal, *Ukr. J. Phys.* **26** No 8, 1387 (1981).