

**МОДЕЛЮВАННЯ ЗВОРотної ХВИЛІ В ІЗОТРОПНОМУ ЛІВОМУ  
СЕРЕДОВИЩІ**

*У статті пропонується методика пояснення з допомогою комп'ютерної моделі однієї із властивостей лівого середовища – антипаралельність фазової та групової швидкостей поширення світлової хвилі.*

*In the article the method of explanation is offered with the help of computer model one of properties of the left-handed medium is antiparallelness of phase and group speeds of distribution of light wave.*

Однією із концептуальних засад процесу підготовки фахівців з фізики є фундаменталізація фізичної освіти. Це, очевидно, означає, що вивчення фізики повинно базуватися на фундаментальних принципах фізики та відображати діалектику емпіричного і теоретичного в структурі фізичного знання [15].

Фундаменталізація фізичної освіти в нинішніх умовах – це реалізація програми А. Ейнштейна [17].

Такий підхід також відповідає і нинішнім задачам реформування змісту фізичної освіти в Україні у напрямку фундаменталізації її як частинного випадку більш глобального принципу фундаменталізації освіти, запропонованого С.У. Гончаренко. “... перед ученими і педагогами сьогодні стоїть кардинальне завдання – виявити цілісність кожної з фундаментальних наук, потім виявити цілісність усього природознавства та всього гуманітарного знання, і нарешті, на наступному етапі створити основи цілісної фундаментальної освіти” [14: 5].

У вітчизняній методичній періодиці практично відсутні спроби пояснення причин виникнення від'ємного показника заломлення [13]. З іншого боку, як свідчить аналіз концепцій фізичної освіти в Україні [16], одним із недоліків вказаних концепцій є застарілість програм, в яких недостатньо уваги приділяється вивченню сучасних наукових досягнень (нелінійні явища, лазери, нанотехнології і, зокрема явище від'ємного відбивання і заломлення).

Уже створені матеріали з від'ємним показником заломлення [3-11]. Це так звані метаматеріали та фотонні кристали-середовище з просторово-періодичним показником заломлення  $n(\vec{r})$ .

Середовища з від'ємним показником заломлення називають також лівими середовищами.

Характерною особливістю лівих ізотропних середовищ являється протилежна направленість фазової і групової швидкості електромагнітної (ЕМ) хвилі в них.

Досвід пояснення та вивчення властивостей явищ поширення електромагнітних хвиль у метаматеріалах говорить про певні проблеми в розумінні студентами антипаралельності групової та фазової швидкостей.

Метаматеріали – штучні матеріали, що мають ЕМ властивості, які не зустрічаються в природі [6: 788; 7].

Метаматеріали – це композити на діелектричній основі, до складу яких входять мікроструктури – металеві елементи (резонатори) розміром менше довжини електромагнітної хвилі і які розташовані у просторі в строгому геометричному порядку та утворюють структуру, що нагадує кристал. Металевих елементів два різновиди. Перший – це просто металеві стерженьки, вони як антени взаємодіють з електричною складовою ЕМ хвилі. Другий різновид – це малесенькі кільця з прорізами, маленькі антени, що взаємодіють з магнітною складовою ЕМ хвилі. Вони розташовані в строгому порядку, утворюючи

решітку з періодом  $a < \lambda$ , де  $\lambda$  довжина ЕМ хвилі. Підбором усіх параметрів такої решітки можна одержати середовище з різним показником заломлення [7: 790].

Експериментально спостерігалось не тільки від'ємне заломлення, а й від'ємне відбивання в феритових плівках [7; 9; 11].

Вперше на можливість існування від'ємного заломлення вказано в роботах Л.І. Мандельштама 1940-1945 рр. [2: 395, 434-435] та більш детально описано в піонерській роботі В.Г. Веселаго [1].

Дійсно, із граничної умови для тангенційної складової вектора напруженості електричного поля ЕМ хвилі одержуємо співвідношення [13: 236-238]

$$k \cdot \sin \alpha = k_d \cdot \sin \beta, \quad (1)$$

де  $k$  – значення хвильового вектора падаючої ЕМ хвилі,  $k_d$  – значення хвильового вектора заломленої ЕМ хвилі,  $\alpha$  і  $\beta$  – відповідно, кут падіння й кут заломлення (див. рис. 1).

Але співвідношення (1), як це вперше показано в [2: 434-435], може задовольнятися і рівністю

$$k \cdot \sin \alpha = k_d \cdot \sin(\pi - \beta). \quad (2)$$

Це означає, що хвильовий вектор  $\vec{k}_d$  заломленої хвилі може бути направлений так, як це показано на рис. 1.

Тобто, класична електродинаміка не заперечує можливого існування ходу заломленого променя як зображено на рис. 1. Оскільки напрям хвильового вектора  $\vec{k}_d$ , як відомо, співпадає з напрямком фазової швидкості, то це означає, що заломлена хвиля поширюється в другому середовищі в напрямку до межі поділу, а не від межі поділу цих двох діелектриків.

“Звідки ми знаємо, що заломлена хвиля йде вниз, а не вгору? Це теж привноситься в рішення задачі ззовні і пов'язано з інтуїтивним переконанням, що групова швидкість направлена так само, як і фазова” [2: 394].

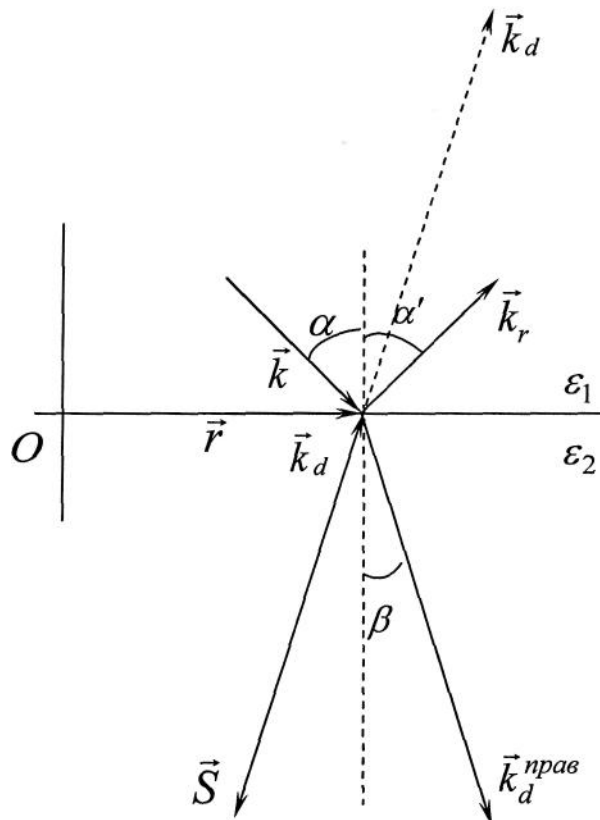


Рис. 1. Умова (1) допускає існування “заломленої” ЕМ хвилі, фазова швидкість якої направлена із другого середовища до межі поділу двох діелектриків.

Оскільки напрям переносу енергії ЕМ хвилі визначається вектором Пойнтінга, а, згідно з теоремою Леонтовича, швидкість переносу енергії будь-якої хвилі залежить від групової швидкості, то в лівому середовищі напрям хвильового вектора прямо протилежний вектору Пойнтінга.

Тобто, характерною особливістю розповсюдження ЕМ хвиль у лівих середовищах являється те, що вектори  $\vec{k}, \vec{E}, \vec{H}$  ЕМ хвилі утворюють ліву трійку або, що теж саме, групова швидкість в будь-якій точці лівого середовища антипаралельна фазовій швидкості [1].

Поняття від'ємного показника заломлення виникло із наступних міркувань.

Потік енергії, що переноситься хвилею, визначається вектором Пойнтінга  $\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$ . Вектор  $\vec{S}$  утворює з векторами  $\vec{E}$  і  $\vec{H}$  праву трійку.

Виходячи з рівнянь Максвелла, можна показати, що вектори  $\vec{k}, \vec{E}, \vec{H}$  зв'язані співвідношеннями:

$$\vec{H} = \frac{[\vec{k}, \vec{E}]}{\mu\mu_0\omega}, \quad \vec{E} = -\frac{[\vec{k}, \vec{H}]}{\varepsilon\varepsilon_0\omega} \quad (3)$$

З цих рівнянь видно, що при  $\varepsilon > 0$  і  $\mu > 0$  вектори  $\vec{k}, \vec{E}, \vec{H}$  утворюють праву трійку векторів.

Якщо припустити, що  $\varepsilon < 0$  і  $\mu < 0$ , то  $\vec{k}, \vec{E}, \vec{H}$ , згідно формул (3) утворюють ліву трійку векторів, тобто напрямом фазової швидкості, що за напрямом співпадає з напрямком хвильового вектора  $\vec{k}$ , буде протилежним напрямку поширення енергії (сигналу) електромагнітної хвилі. Це означає, що в таких середовищах групова швидкість електромагнітної хвилі антипаралельна фазовій.

Тому для правих речовин  $\vec{S}$  і  $\vec{k}$  направлені в один бік, а лівих – у різні.

Оскільки вектор  $\vec{k}$  співпадає за напрямом з фазовою швидкістю, то ясно чому ліві речовини мають показник заломлення  $n < 0$ . Однак не слід розуміти це буквально. Якщо і  $\varepsilon < 0$  і  $\mu < 0$ , то  $n^2 = \varepsilon\mu > 0$ . Але все одно вважається, що ми маємо справу з лівим середовищем для якого показник заломлення від'ємний.

**Суть не в знаку  $n$ , а в тому, що в лівих середовищах  $\vec{v}_{zp} \uparrow\downarrow \vec{v}_{\phi}$ .**

Щоб уникнути цієї термінологічної непослідовності В. Веселаго [1] запропонував ліві середовища для яких  $\vec{S} \uparrow\downarrow \vec{k} (\vec{v}_{zp} \uparrow\downarrow \vec{v}_{\phi})$  характеризувати правизною  $p = -1$ .

Тоді, зокрема, звичайний закон заломлення (формула Снеліуса) потребує уточнення, якщо  $n_1$  та  $n_2$  мають різні знаки.

Для будь-яких середовищ вірний запис цієї формули має вигляд [1]:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v}{v_d} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} = \frac{p_2}{p_1} \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}, \quad (3)$$

де  $p_2$  і  $p_1$  – правизна другого і першого середовищ відповідно,  $p = +1$  для правої речовини і  $p = -1$  – лівої.

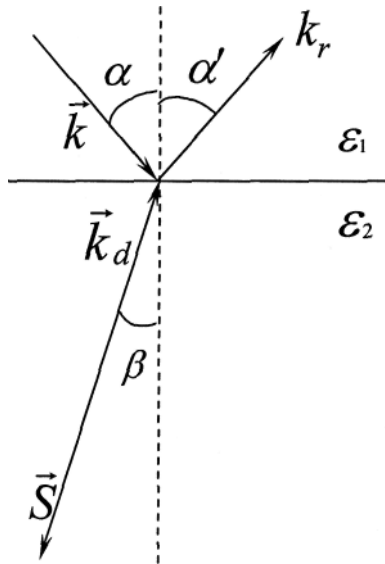


Рис. 2. Хід заломленого променя при переході від правого до лівого середовища.

На рис. 2 показаний напрям хвильового вектора  $\vec{k}_d$  та вектора Пойнтінга  $\vec{S}$  в лівому середовищі при падінні ЕМ хвилі на межу поділу правого та лівого діелектрика.

Хвильовий пакет найбільш повно передає властивості ЕМ хвиль у реальних експериментах.

Хвильовий пакет (група хвиль) одержуємо як результат суперпозиції сукупності плоских “монохроматичних” ЕМ хвиль, що поширюються в напрямку осі  $OX$  й хвильові вектори яких лежать в дуже вузькому інтервалі

$$2\Delta k < k_0 \text{ [13, с. 226-229], (рис. 3).}$$

$$\psi(x, t) = 2C \cdot e^{i(\omega_0 t - k_0 x)} \cdot \frac{\sin[\Delta k \cdot (gt - x)]}{\Delta k \cdot (gt - x)} \cdot \Delta k, \quad (4)$$

де  $k_0$  – центральне значення хвильового вектора,

$$v_\phi = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega_0}{k_0},$$

$$g = v_{gp} = \frac{dx}{dt} = \left(\frac{d\omega}{dk}\right)_{k_0}$$

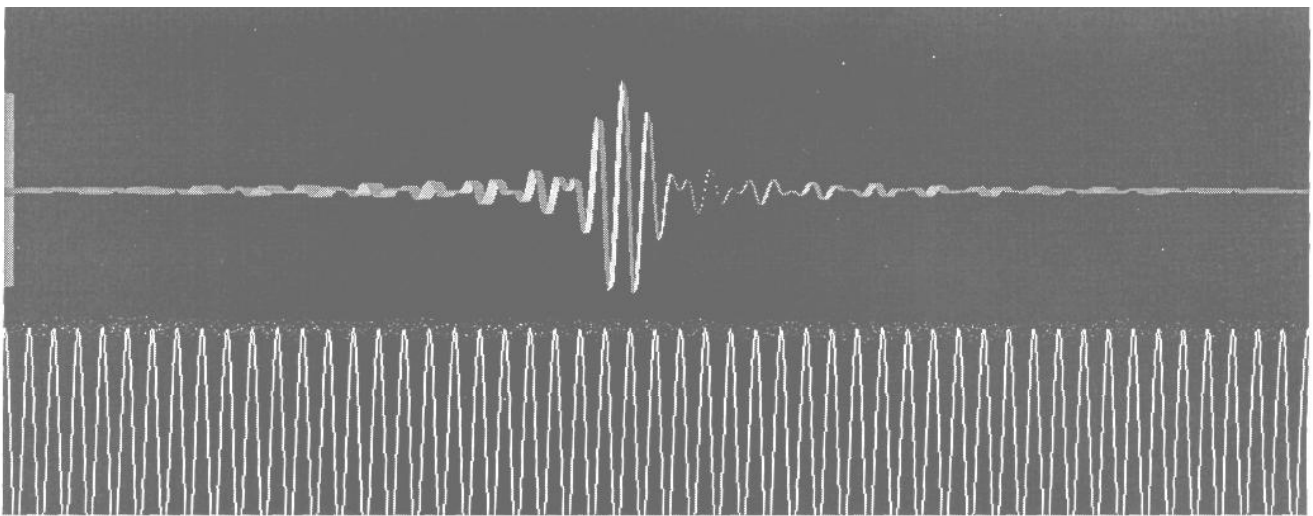


Рис. 3. У результаті суперпозиції монохроматичних хвиль утворюється хвильовий пакет, якщо  $\Delta k \ll k_0$ .

Формулу для групової швидкості подають у такому вигляді:

$$v_{gp} = \left(\frac{d\omega}{dk}\right)_{k_0} = v_{\phi} - \lambda \frac{dv_{\phi}}{d\lambda} \quad (5)$$

Якщо в деякому середовищі залежність фазової швидкості від довжини хвилі така (закон дисперсії), що  $\frac{dv_{\phi}}{d\lambda} > 0$ ,  $\left(\frac{dv_{\phi}}{dv}\right) < 0$ ,  $\frac{dn}{dv} > 0$ ,  $\frac{dn}{d\lambda} < 0$ ,

Де  $n$  – показник заломлення ЕМ хвилі,  $\nu$  – частота ЕМ хвилі, то говорять що спостерігається нормальна дисперсія.

Як видно із формули (5) групова швидкість може бути більша або менша за фазову швидкість, або дорівнювати нулю.

Якщо другий доданок в (5),  $-\lambda \frac{dv_{\phi}}{d\lambda}$ , більший за  $v_{\phi}$ , т  $\vec{v}_{gp} \uparrow \downarrow \vec{v}_{\phi}$

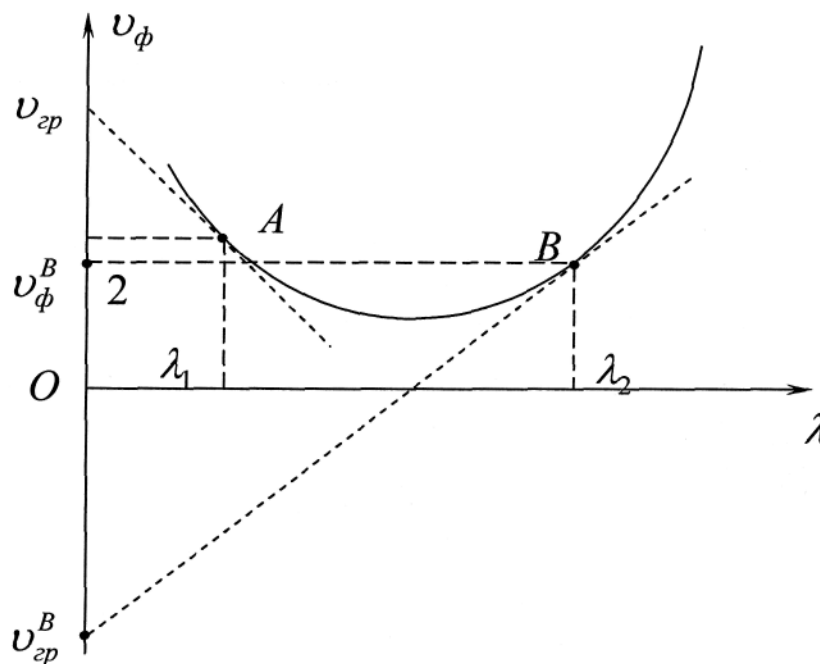


Рис. 4. Ілюстрація способу знаходження групової швидкості за графіком.

Існує графічний спосіб знаходження групової швидкості по кривій дисперсії  $v_{\phi}(\lambda)$ .

Із рис. 4 видно, що відрізок, який відсікається на осі ординат дотичною до кривої  $v_{\phi}(\lambda)$

проведеною в будь-якій точці цієї кривої якраз і дорівнює  $v_{gp} = v_{\phi} - \lambda \frac{dv_{\phi}}{d\lambda}$ .

При від'ємному значенні групової швидкості пакет (група хвиль) рухається в сторону протилежну напрямку поширення хвиль, які власне і утворюють хвильовий пакет.

Для пояснення антипаралельності групової та фазової швидкостей, нами, крім аналітичного та графічного пояснення  $\vec{v}_{gp} \uparrow \downarrow \vec{v}_{\phi}$ , використовуються і комп'ютерні моделі.

З цією метою нами змодельоване поширення хвильового пакету в ізотропному середовищі з законом дисперсії, який допускає від'ємне значення групової швидкості.

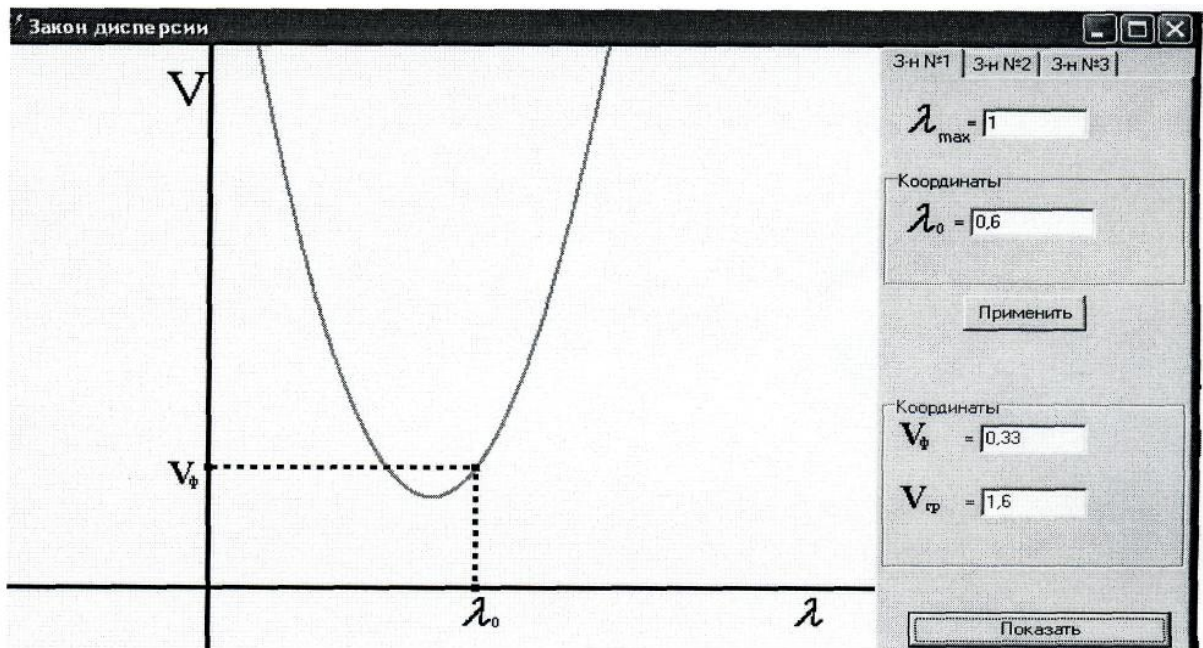


Рис. 5. Параболічний закон дисперсії.

Величина і напрямок поширення групи хвиль визначається співмножником  $\frac{\sin[\Delta k \cdot (gt - x)]}{\Delta k \cdot (gt - x)}$  формули (4) та законом дисперсії.

Дійсно, для довільної точки правої гілки параболічного закону дисперсії (рис. 5), для якої  $-\lambda \frac{dv_\phi}{d\lambda} > v_\phi$  будемо мати  $\vec{v}_{гр} \uparrow \downarrow \vec{v}_\phi$ . І комп'ютерна програма дозволяє спостерігати поширення хвильового пакету в напрямку протилежному вектору  $\vec{v}_\phi$  (рис. 6).

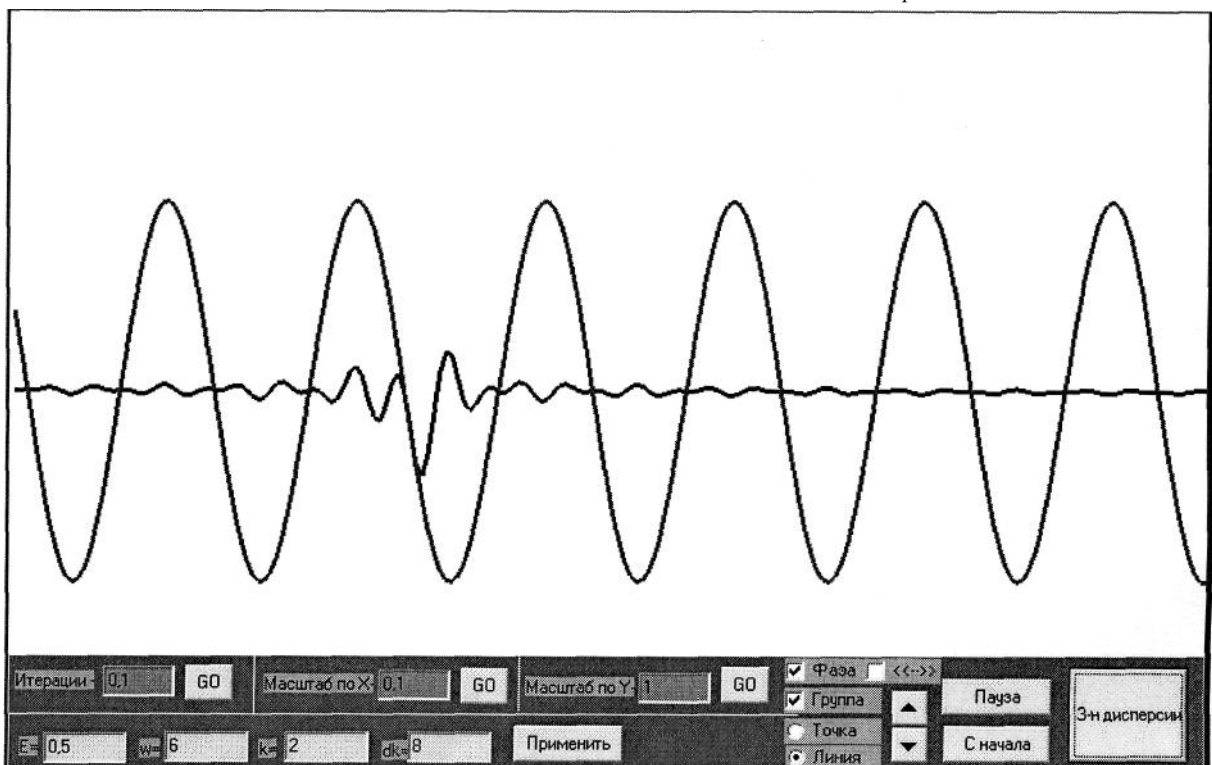


Рис. 6. Вектор групової швидкості направлений протилежно вектору фазової швидкості.

## Висновки.

1. Методика викладання та вивчення законів геометричної оптики повинна, з урахуванням сучасних досягнень щодо створення метаматеріалів, бути суттєво переглянута. Враховуючи те, що показники заломлення можуть бути як додатними, так і від'ємними, закони геометричної оптики стосовно відбивання і заломлення повинні бути переформульовані.

Очевидно, що опис законів геометричної оптики в наявних нині посібниках з фізики як для вищої, так і для середньої шкіл повинен бути окремим випадком більш загального подання цих законів [11].

2. Ситуація, яка склалася в освітній галузі з фізики, потребує значних змін. У таких обставинах найбільш загальним і системоутворюючим принципом може бути принцип фундаменталізації фізичної освіти [14].

Якщо виявляється, що в науці зроблений крок до більш глибокого розуміння фізичного явища, то і при вивченні цього явища в ВНЗ чи СНЗ слід відображати цей більш високий рівень розуміння та адекватної інтерпретації.

“... надмірне дотримання історії відкриттів, відмова від належного теоретичного аналізу й відсутність загальної методології привели до того, що сьогодні цей курс по суті розпався на сукупність окремих спецкурсів, мало зв'язаних один з одним. Йдеться не лише про необхідність збільшення обсягу курсу фізики. Потрібна його якісна перебудова, яка забезпечувала б відповідність фізики як навчальної дисципліни сьгоднішній логіці й структурі фізики як науки” [14: 7].

До речі, нами ще раніше наголошувалося, що “структура вивчення електродинаміки не відповідає суті і методології цього розділу фізики як наукової галузі” [15: 101 – 102].

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями // УФН. – 1967. – Т. 92. – Выпуск 3. – С. 517 – 525.
2. Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. – М.: Наука, 1972. – 437 с.
3. Веселаго В.Г. Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления // УФН. – 2003. – Т. 173. – №7. – С. 790-794.
4. Блюх К.Ю., Блюх Ю.П. Что такое левые среды и чем они интересны? // УФН. – 2004. – Т. 174. – №4. – С. 440-447.
5. Вашковский А.В., Локк З.Г. Возникновение отрицательного коэффициента преломления при распространении поверхностной магнитостатической волны через границу раздела сред феррит – феррит-диэлектрик-металл // УФН. – 2004. – Т. 174. – №6. – С. 658-662.
6. Smith D.R., Pendry J.B. M.C.K. Wiltshire, Metamaterials and negative refractive index.-Science, 2004.-V.305, p.788-792
7. Вашковский А.В., Локк З.Г. Прямые и обратные неколлинеарные волны в магнитных пленках // УФН. – 2006. – Т. 176. – №5. – С. 557 – 562.
8. Силян Р.А. Электромагнитные волны в искусственных периодических структурах // УФИ. – 2006. – Т. 176. – №5. – С. 562 – 565.
9. Вашковский А.В., Локк З.Г. Свойства обратных электромагнитных волн и возникновение отрицательного отражения в ферритовых пленках // УФИ. – 2006. – Т. 176. – №4. – С. 403 – 414.
10. Шевченко В.В. Прямые и обратные волны: три определения их взаимосвязей, условия применимости // УФИ. – 2007. – Т. 177. – №3 – С. 301-306.
11. Локк З.Г. Свойства изочастотных зависимостей и законы геометрической оптики // УФИ. – 2008. – Т. 178. – №4. – С. 397 – 417.
12. Коновал О.А., Половина Г.П., Тополя І.В. Методика побудови зображень в лівих середовищах // Вісник Чернігівського державного педагогічного університету імені Т.Г. Шевченка. Випуск 36(2). Серія: педагогічні науки. – Чернігів: ЧДПУ, 2006. – № 36. – Т. 2. – С. 106-114.
13. Коновал О. А. Основи електродинаміки: навч. посіб для студ. вищ. пед. навч. закл. / О.А.Коновал; Міністерство освіти і науки України; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2008. – 347 с.

14. Гончаренко С.У. Принцип фундаменталізації освіти// Наукові записки. – Серія: Педагогічні науки. – Кіровоград: РВЦ КДПУ ім. В. Винниченка. – 2004. – Вип. 55. – С. 3-8.
15. Коновал О.А. Обґрунтування рівнянь Максвелла на основі принципу відносності // Зб. наук. праць Кам'янець-Подільського держ. пед. ун-ту: Серія педагогічна: Методологічні принципи формування фізичних знань учнів і професійних якостей майбутніх учителів фізики та астрономії. – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський державний університет, ІВВ, 2003. – Вип. 9. – С. 101-103.
16. Корсак К.В. Якою має бути нова фізика – XXI у середній і вищій школі? // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики. Вип. V: У 3-х томах. – Кривий Ріг, 2005. – Т. 2. – С. 159-164.
17. Коновал О. А., Касперський А. В. Методичні основи вивчення електродинаміки на засадах теорії відносності // Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова. Серія № 5 Педагогічні науки: реалії та перспективи. – Вип. 12: Зб. наук. пр.: За ред. П. В. Дмитренка, В. Д. Сиротюка. – К.: Вид-во НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2008. – С. 152-161.

**УДК 378**

**О.М. Пустовий, В.П. Сергієнко**

### ***НАНОТЕХНОЛОГІЇ У ЗАГАЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ ВИЩОЇ ШКОЛИ***

*У статті розглянуто питання інтеграції сучасних наукових досягнень в освіту. Показано як потрібно розкрити поняття нанотехнологій при вивченні загального курсу фізики майбутніми вчителями.*

*In clause questions of integration modern scientific achievements in education are considered. It is shown as it is necessary to open concept nanotechnology at studying the general rate of physics by the future teachers.*

Неодмінною умовою соціально-економічного розвитку суспільства є використання плідних взаємозв'язків між наукою та освітою. Сучасні наукові досягнення взагалі дуже швидко втілюються у побут і не завжди освітні технології встигають використовувати ці здобутки.

Так, наприклад, сучасна наука досягла рівня нанотехнологій, але, на жаль, ці досягнення майже ніде не використовуються в освіті. Термін “нанотехнології” у 1974 році запропонував японець Норіо Танігучі для опису процесу створення нових об'єктів і матеріалів за допомогою маніпуляцій з окремими атомами. Але ідея про те, що можливо збирати пристрої та працювати з об'єктами, які мають нанорозміри була вперше висловлена у виступі лауреата Нобелівської премії Річарда Фейнмана у 1959 році в Каліфорнійському технологічному інституті (“Там, внизу, багато місця!”) [1; 2]. Слово “внизу” у назві лекції означало у “світі дуже малих розмірів”. Тоді Фейнман сказав, що коли-небудь, наприклад, у 2000 році, люди будуть дивуватись тому, що до 1960 року ніхто не сприймав серйозно дослідження наносвіту. За словами Фейнмана, людина дуже довго жила, не помічаючи, що поряд з нею живе цілий світ об'єктів, роздивитись котрі вона не в змозі. Ну, а якщо ми не бачимо ці об'єкти, то ми не можемо і працювати з ними.

У Росії НАНО-хвиля докотилась до окружних департаментів освіти, тобто до шкіл та учнів. Учителям пропонують проводити оплачувані департаментом додаткові заняття з основ нанотехнологій. В Ульяновському державному університеті розроблено навчальний посібник для 10-11 класів з фізики, хімії, біології (“Введение в нанотехнологии”) [3].

В усьому світі сучасні наукові досягнення інтегруються в освіту, і це підтримується такими відомими організаціями, як ЮНЕСКО.

Сьогодні нанотехнології стають майже обов'язковим напрямком в усіх серйозних університетах Європи та Америки.