

МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ

Малиш М.І., кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, M_Malysh@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4532-0764

Мозговий О.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, , mavimfto@gmail.com, orcid.org/orcid.org/0000-0002-0797-8779

Клочан А.Є., PhD, Національний транспортний університет, Київ, Україна, varsenchuk@gmail.com, orcid.org/0000-0002-4225-9382

OPTICAL SIGNAL MODULATION METHODS

Malysh M.I., PhD in Physical and Mathematical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, M_Malysh@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4532-0764

Mozghovyi O.V., PhD in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, mavimfto@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0797-8779

Klochan A.Ye., PhD, National Transport University, Kyiv, Ukraine, varsenchuk@gmail.com, orcid.org/0000-0002-4225-9382

Вступ. У даній статті проаналізовані різні методи модуляції оптичного сигналу. З метою збільшення обсягу інформації, яка переноситься світловим променем, використовують модуляцію світла. Кількість інформації, яку можна передати шляхом модуляції потоку світла, тим більша, чим більша несуча частота коливаль. Під модуляцією розуміють зміну по заданому закону в часі амплітуди (інтенсивності), частоти, фази або поляризації коливаль оптичного випромінювання. Залежно від того, яка характеристика піддається зміні, розрізняють амплітудну, фазову, частотну або поляризаційну модуляції світла. Найчастіше для модуляції світла використовують ефекти зміни показника заломлення середовища під дією зовнішнього поля: електрооптичні (ефекти Керра і Погкельса), магнітооптичні (ефект Фарадея). У модуляторах, що працюють на цих ефектах, відбувається фазова модуляція світла з наступним перетворенням її в амплітудну модуляцію. Частоти модулюючих сигналів, можуть досягати 10^{11} Гц.

Сучасні системи передачі інформації по оптичних каналах складаються з трьох основних компонентів: передавача, приймача світла та оптичного каналу, по якому передається інформація. У передавачі здійснюється кодування електричних сигналів, перетворення їх в оптичні, які по оптичному каналу пересилаються до приймача, де й відбувається перетворення оптичної інформації в сукупність електричних сигналів. Будь-який детектор приймача є лічильником фотонів, який не реагує на фазу і поляризацію світла. Найчастіше генератором оптичних сигналів служить напівпровідниковий лазерний діод, а приймачем – фотодіод.

Зазвичай для кодування інформації використовується двійкова система. Така система реалізується або шляхом модуляції амплітуди оптичного сигналу або зміною тривалості імпульсного сигналу. Останній тип модуляції відомий як широтно-імпульсна модуляція (ШІМ — англ. pulse-width modulation, PWM). У першому випадку за “одиницю” приймається максимальне значення амплітуди сигналу, а в другому – більша тривалість імпульсів. За “нуль” приймається відповідно мінімальне значення амплітуди сигналу та найменше значення тривалості імпульсного сигналу.

Розрізняють дві основні експериментальні методики реалізації двійкової системи передачі інформації: внутрішнє і зовнішнє керування інтенсивністю світлового потоку. Поява лазерів викликала інтенсивний розвиток методів модуляції світла, заснованих на управлінні когерентним випромінюванням за рахунок зміни параметрів лазера. При цьому багато пристроїв, що застосовуються як зовнішні модулятори, розміщуються всередині оптичного резонатора лазера.

При внутрішній модуляції параметри випромінювання формуються безпосередньо в генераторі оптичного випромінювання, а при зовнішній модуляції параметри випромінювання формуються модуляторами після виходу світла з генератора. Для випромінювання видимого та

ближнього інфрачервоного діапазонів ($10^{14} - 10^{15}$ Гц) можливі частоти модуляції з верхньою межею до $10^{11} - 10^{12}$ Гц.

Внутрішня модуляція. При внутрішній модуляції випромінювання джерело світла модулюється зовнішнім електричним струмом живлення напівпровідникового лазера. Швидкість v передачі інформації в лазерах з вертикальним резонатором $v \leq 1$ Гбіт/с, в лазерах з резонатором Фабрі-Перо $v \leq 2,5$ Гбіт/с, в лазерах з розподіленим зворотним зв'язком та в лазерах з розподіленими брегівськими відбивачами $v \leq 10$ Гбіт/с [1].

Зовнішня модуляція [2]. З усіх методів зовнішньої модуляції [2] нас будуть цікавити лише поляризаційні методи, а саме методи на основі ефектів Керра, Поккельса, Фарадея. Спільним у цих методах є поворот площини поляризації під дією зовнішнього фактору. Спрощена схема дослідження повороту площини поляризації цими методами показана на рис. 1. У цих методах є наявність фотоприймача, який є детектором фотонів, тому інформація про фазу і частоту світлової хвилі, яка падає на фотоприймач, втрачається.

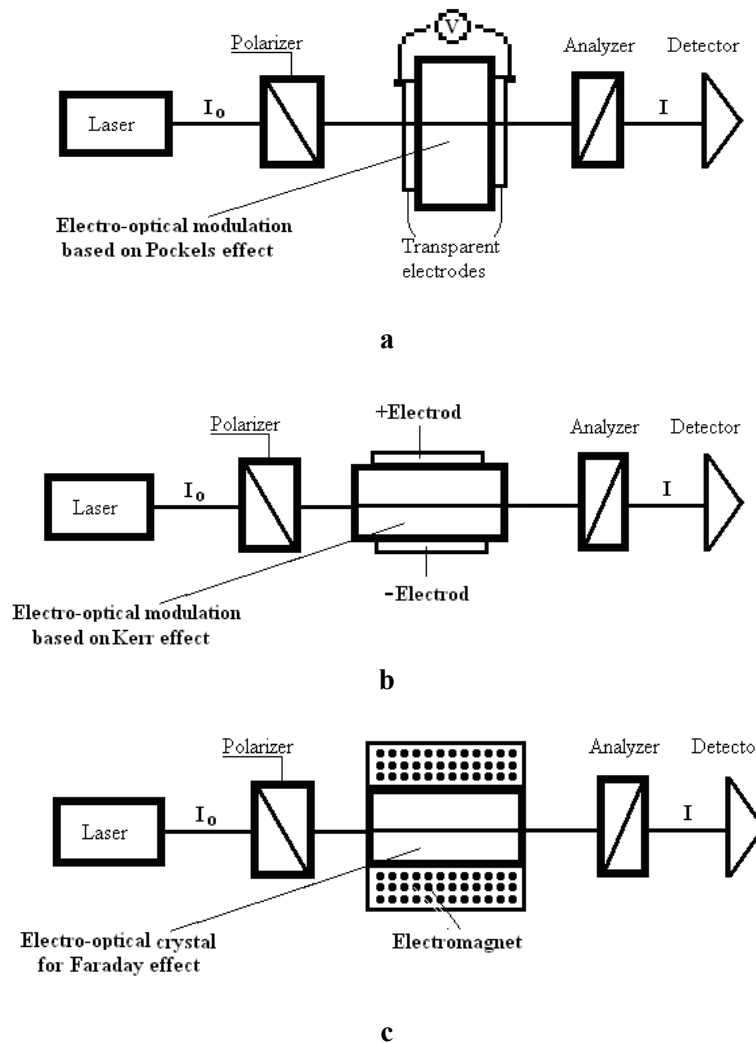


Рисунок 1 – Поляризаційні модулятори на основі ефекту Поккельса (а), Керра (b), Фарадея (c).
Figure 1 – Polarization modulators based on the Pockels effect (a), Kerr (b), Faraday (c)

Головними параметрами, які характеризують амплітудну модуляцію світла, є: основна частота, ширина смуги частот модулюючого сигналу, абсолютне значення амплітуди модуляції та прозорість модулятора, глибина модуляції

$$m = 100\%(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}), \quad (1)$$

де $I_{\min}$ і $I_{\max}$ – мінімальне і максимальне значення інтенсивності.

У наведених на (рис. 1) поляризаційних модуляторах інтенсивність світла I на виході з аналізатора описується законом Малюса [3]:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi = I_0 \cos^2 \left(\varphi_0 - \pi \frac{V}{V_\pi} \right), \quad (2)$$

де I_0 – інтенсивність світла на виході з лазера, $\varphi = (\varphi_0 - \pi V / V_\pi)$ – кут повороту площини поляризації, φ_0 – величина зсуву залежності інтенсивності від кута повороту аналізатора, що виникає при увімкненні електричного поля, V – напруга, V_π – півхвильова напруга.

На практиці всі види поляризаційної модуляції світла перетворюються в амплітудну модуляцію або безпосередньо в схемі модулятора, або за допомогою спеціальних пристроїв, які розміщені на виході з передавача.

Електрооптична модуляція. Показник заломлення електрооптичного середовища $n(E)$ є функцією напруженості електричного поля E [3,4]

$$n(E) = n + a_1 E + 0,5 a_2 E^2 + \dots, \quad (3)$$

де $n = n(E=0)$, $a_1 = (dn/dE)_{E=0}$, $a_2 = d^2 n / dE^2|_{E=0}$. У рівнянні (3) перший доданок не залежить від величини напруженості електричного поля, другий доданок лінійно і третій квадратично залежить від напруженості електричного поля. Величина другого і наступних доданків, як правило, на багато порядків менша за n .

У багатьох матеріалах третій і подальші доданки в рівнянні (3) є незначними у порівнянні з другим. У цьому випадку залежність n від E наступна

$$n(E) \approx n - 0,5 a_p n^3 E. \quad (4)$$

Середовище, для якого виконується рівняння (4), відоме як середовище Покельса. Коефіцієнт a_p називається коефіцієнтом Покельса або лінійним електрооптичним коефіцієнтом. Типові значення a_p знаходяться у діапазоні від 10^{-12} до 10^{-10} В/м. Наприклад, для $E = 10^6$ В/м, прикладеної до комірки товщиною 1 см, доданок $0,5 a_p n^3 E$ у рівнянні (4) становить від 10^{-6} до 10^{-4} . Це означає, що зміни показника заломлення, індуковані електричними полями, дуже малі. Найчастіше в комірках Покельса використовуються наступні кристали: $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ADP), KH_2PO_4 (KDP), LiNbO_3 , LiTaO_3 , CdTe .

Якщо матеріал центросиметричний, як у випадку газів, рідин та деяких кристалів, $n(E)$ має бути парною симетричною функцією. В цьому випадку перша похідна в рівнянні (3) зникає і залежність n від E стає наступною

$$n(E) \approx n - 0,5 a_k n^3 E^2. \quad (5)$$

Матеріал, в якому виконується рівняння (5), відомий як середовище Керра (або комірка Керра). Параметр a_k називається коефіцієнтом Керра або квадратичним електрооптичним коефіцієнтом. Типові значення a_k є від 10^{-18} до 10^{-14} м²/В² у кристалах та 10^{-22} до 10^{-19} м²/В² у рідинах. Для $E = 10^6$ В/м, доданок $a_k n^3 E^2$ за порядком величини становить від 10^{-6} до 10^{-2} у кристалах і від 10^{-10} до 10^{-7} у рідинах [3,4].

Ефект Покельса [3]. Якщо світло проходить через оптичний хвильовод довжиною L , до якого прикладено електричне поле E , воно зазнає фазового зсуву φ

$$\varphi = \frac{2\pi a_p n^3 E L}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} n^3 a_p V = \pi \frac{V}{V_\pi}, \quad (6)$$

де $E = V/L$ – напруженість електричного поля, V – напруга, прикладена до електрооптичного середовища довжиною L , V_π – півхвильова напруга, тобто така величина напруги, при досягненні якої φ стає рівним π

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2n^3 a_p}. \quad (7)$$

Як уже згадувалось раніше величина a_p мала, тому значення V_{π} велике. Зокрема при опроміненні кристалу BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) світлом гелій-неонового лазера з $\lambda = 632.8$ нм маємо $n = 2.098$ і $a_p = 1.03 \times 10^{-12}$ м/В, $V_{\pi} \approx 17$ кВ [5] (рис. 2). Згідно з рис. 2 експериментальна залежність пропускання $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ описується законом Малюса.

Як видно з рис. 2, максимальна прозорість BGO комірки Поккельса для $\lambda = 1319$ нм досягається коли величина прикладеної напруги $V = 37772$ В [6]. У той же час для комірки ZnSe $V \approx 21735$ В [6].

При використанні комірок Поккельса для модуляції потоку світла потрібно враховувати необхідність прикладання напруги в кілька десятків кіловольт і нанесення прозорих омичних контактів.

Ефект Керра [7,8]. Під ефектом Керра розуміють виникнення подвійного променезаломлення в оптично ізоотропних середовищах у результаті дії на них зовнішнього однорідного електричного поля. В цьому випадку середовище стає анізотропним і набуває властивостей одновісного кристалу, оптична вісь якого направлена вздовж електричного поля.

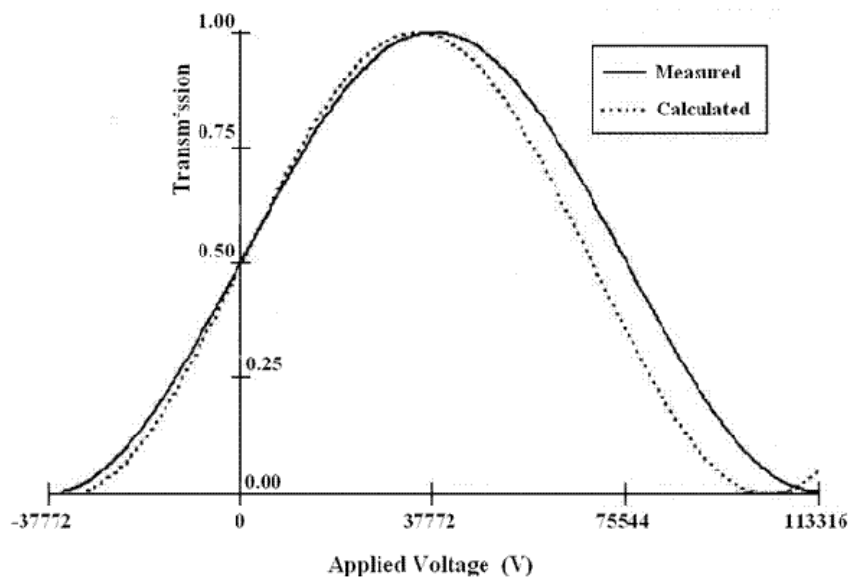


Рисунок 2 – Залежність пропускання BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) комірки Поккельса від напруги її живлення. Довжина хвилі 1319 нм. Електроди виготовлені з ІТО. Адаптовано з [6].

Figure 2 – Dependence of the transmittance of BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) Pockels cell on its supply voltage. Wavelength 1319 nm. Electrodes are made of ITO. Adapted from [6].

Причиною цього є орієнтування електричним полем полярних молекул вздовж напрямку поля та індукування електричного моменту у неполярних молекулах.

Для дослідження ефекту Керра між схрещеними поляризатором і аналізатором розміщують комірку Керра (рис. 1b), у якій міжелектродний простір заповнений прозорою ізоотропною речовиною. При увімкненні поля в середовищі відбувається поділ світлового променя на два: звичайний (o) і незвичайний (e). У результаті їх проходження через речовину між ними виникає різниця фаз δ

$$\delta = \frac{2\pi L}{\lambda} \cdot (n_e - n_o) = 2\pi a_K L E^2 = \frac{2\pi a_K L V^2}{d^2}, \quad (8)$$

де L – довжина шляху в речовині, λ – довжина хвилі світла, n_e і n_o відповідно показник заломлення незвичайного і звичайного променя, a_K – постійна Керра, яка залежить від довжини хвилі,

температури, агрегатного стану речовини, структури молекул речовини, E – напруженість електричного поля, V – напруга, d – відстань між електродами.

Можна показати [7], що при наявності електричного поля, прикладеного до электродів комірки Керра, інтенсивність світла I на виході з аналізатора буде

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} = I_0 \sin^2 \frac{\pi a_K L U^2}{d^2}, \quad (9)$$

де I_0 – інтенсивність світла, що падає на поляризатор.

Зазвичай для дослідження ефекту Керра використовуються як гази [7]: molecular hydrogen (H_2), carbon dioxide (CO_2), dimethyl (CH_3) $_2O$, trifluoromethane (CHF_3), так і рідини: nitrobenzene ($C_6H_5NO_2$) [8].

Оскільки ефект Керра відносно слабкий, для його дослідження може знадобитись напруга до 55 кВ. У той же час як комірки Поккельса можуть працювати при значно менших напругах. У широко поширених модуляторах на основі ефекта Поккельса фазовий зсув між звичайним і незвичайним променями лінійно залежить від величини напруженості електричного поля, а в модуляторах на основі ефекта Керра – залежність квадратична.

Ефект Фарадея [9]. Ефект Фарадея полягає у повороті площини поляризації при проходженні лінійно поляризованого світла через прозоре середовище, що знаходиться в поздовжньому магнітному полі. Інтенсивність світла I на виході з середовища описується законом Малюса.

Експериментально встановлено, що різниця між початковим і кінцевим кутовим положенням поляризатора φ (або кут повороту площини поляризації) є такою

$$\varphi_0 = V_e L H, \quad (10)$$

де V_e – константа Верде, яка є функцією довжини хвилі падаючого світла, H – напруженість магнітного поля, L – довжина комірки Фарадея.

Інтенсивність світла на виході з аналізатора I (рис. 3) наступна [4]

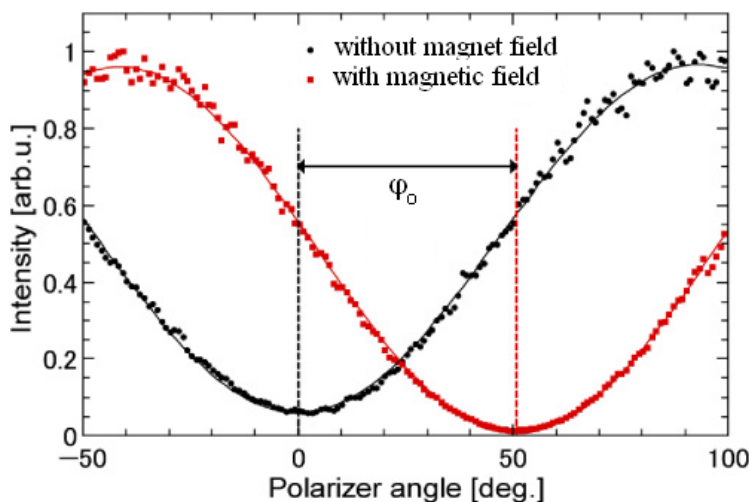


Рис. 3. Залежність інтенсивності від кута повороту аналізатора при наявності (червоні крапки) і відсутності (чорні крапки) магнітного поля. φ_0 – величина зсуву кривої залежності інтенсивності від кута повороту аналізатора, викликаного включенням магнітного поля. Адаптовано з [4]

Fig. 3. Dependence of intensity on the angle of rotation of the analyzer in the presence (red dots) and absence (black dots) of a magnetic field. φ_0 is the mitude of the shift of the curve of the dependence of intensity on the angle of rotation of the analyzer caused by the inclusion of a magnetic field. Adapted from [4]

$$I(\varphi) = I_0 [\cos^2(\varphi_0 + \varphi)] = I_0 [\cos^2(\varphi_0 + V_e L B)], \quad (10)$$

де φ_0 – величина зсуву залежності інтенсивності від кута повороту аналізатора, що виникає при увімкненні магнітного поля, I_0 – інтенсивність світла на вході в поляризатор. У комірках Фарадея досліджуються напівпровідники GaAs, GaSb, Ge, InAs, InSb [10].

Для спрощення вибору методу модуляції оптичних сигналів потрібно скористатись даними таблиці, де наведені основні параметри поляризаційних модуляторів.

Таблиця 1 – Основні параметри поляризаційних модуляторів

Table 1 – Basic parameters of polarization modulators

Параметр	Керр	Поккельс	Фарадей
Середовище	Нітробензол	LiTaO ₃	GaAs
$V_{\lambda/2}$	55.2 кВ	2.7 кВ	0.8 В
Максимальна частота	1 ТГц	(CdTe) до 50 МГц	80 МГц
Глибина модуляції,	100 %	100 %	80 %

Висновок. Швидкість передачі інформації визначається вибором методів амплітудної і поляризаційної модуляції потоку світла. Найпростіше здійснювати амплітудну модуляцію шляхом керування струмом живлення діодних лазерів. Для поляризаційної модуляції світлового потоку доцільно використовувати комірки Фарадея.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. N.A. Shtompel, The choice of modulation method in fiber-optical telecommunication system // Information Systems, 2013, issue 1 (108). <http://www.hups.mil.gov.ua> > soi_2013_1_49.
2. A. Sree Madhuri, Govardhani Immadi, V. Mounika, A. TarunTeja, T. Aakash, N. Sai Srinivasa, Performance Evaluation of Free Space Optics Using Different Modulation Techniques at Various Link Ranges // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249-8958, Volume-8 Issue-4, April 2019. <https://www.ijeat.org> > uploads > papers.
3. E. Bahaa, A. Saleh, Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics // Copyright © 1991 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-83965-5 (Hardback); 0-471-2-1374-8 (Electronic).
4. R.A. Minasian, MODULATORS | Modulation and Demodulation of Optical Signals // Encyclopedia of Modern Optics, 2005. <https://www.sciencedirect.com> >
5. F. Long, J. Zhang, C.Xie, Z. Yuanm, Application of the Pockels Effect to High Voltage Measurement // The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments. ICEMI'2007. DOI: 10.1109/ICEMI.2007.4351190.
6. A.J. Iverson, ELECTRO-OPTIC POCKELS CELL VOLTAGE SENSORS FOR ACCELERATOR DIAGNOSTICS // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science in Electrical Engineering MONTANA STATE UNIVERSITY Bozeman, Montana July 2004. <https://citeseerx.ist.psu.edu> > viewdoc > download.
7. A.L.J. Van Rensburg, Theoretical and Experimental Investigations of the Kerr Effect and Cotton-Mouton Effect // Thesis (M.Sc.)-University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, 2008. <http://hdl.handle.net/10413/168>.
8. E.C. Cassidy and H.N. Cones, A Kerr Electro-Optical Technique for Observation and Analysis of High-Intensity Electric Fields // JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards – C. Engineering and Instrumentation. Vol. 73C, Nos. 1 and 2, January-June 1969. <https://nvlpubs.nist.gov> > nistpubs > jresPDF.
9. Modern Optics. Second Edition. B. D. Guenther. © B. D. Guenther 2015. Published in 2015 by Oxford University Press. <https://global.oup.com> > modern-optics-9780198824329.
10. I.M. Boswarva, A.B. Lidiard, Faraday effect in semiconductors. II // 588-609 278 1964 Proc. R. Soc. Lond. A doi: 10.1098/rspa.1964.0084.

REFERENCES

1. N.A. Shtompel, The choice of modulation method in fiber-optical telecommunication system // Information Systems, 2013, issue 1 (108). <http://www.hups.mil.gov.ua> > soi_2013_1_49.
2. A. Sree Madhuri, Govardhani Immadi, V. Mounika, A. TarunTeja, T. Aakash, N. Sai Srinivasa, Performance Evaluation of Free Space Optics Using Different Modulation Techniques at Various Link Ranges // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249-8958, Volume-8 Issue-4, April 2019. <https://www.ijeat.org> > uploads > papers.
3. E. Bahaa, A. Saleh, Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics // Copyright © 1991 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-83965-5 (Hardback); 0-471-2-1374-8 (Electronic).
4. R.A. Minasian, MODULATORS | Modulation and Demodulation of Optical Signals // Encyclopedia of Modern Optics, 2005. <https://www.sciencedirect.com> >
5. F. Long, J. Zhang, C.Xie, Z. Yuanm, Application of the Pockels Effect to High Voltage Measurement // The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments. ICEMI'2007. DOI: 10.1109/ICEMI.2007.4351190.
6. A.J. Iverson, ELECTRO-OPTIC POCKELS CELL VOLTAGE SENSORS FOR ACCELERATOR DIAGNOSTICS // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science in Electrical Engineering MONTANA STATE UNIVERSITY Bozeman, Montana July 2004. <https://citeseerx.ist.psu.edu> > viewdoc > download.
7. A.L.J. Van Rensburg, Theoretical and Experimental Investigations of the Kerr Effect and Cotton-Mouton Effect // Thesis (M.Sc.)-University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, 2008. <http://hdl.handle.net/10413/168>.
8. E.C. Cassidy and H.N. Cones, A Kerr Electro-Optical Technique for Observation and Analysis of High-Intensity Electric Fields // JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards – C. Engineering and Instrumentation. Vol. 73C, Nos. 1 and 2, January-June 1969. <https://nvlpubs.nist.gov> > nistpubs > jresPDF.
9. Modern Optics. Second Edition. B. D. Guenther. © B. D. Guenther 2015. Published in 2015 by Oxford University Press. <https://global.oup.com> > modern-optics-9780198824329.
10. I.M. Boswarva, A.B. Lidiard, Faraday effect in semiconductors. II // 588-609 278 1964 Proc. R. Soc. Lond. A doi: 10.1098/rspa.1964.0084.

РЕФЕРАТ

Малиш М.І. Методи модуляції оптичного сигналу/ М.І. Малиш, О.В. Мозговий, А.Є. Ключан // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

Проаналізовані різні методи модуляції оптичного сигналу з метою збільшення обсягу інформації, яка переноситься світловим променем. Для модуляції світла запропоновано ефекти зміни показника заломлення середовища під дією зовнішнього поля: електрооптичні (ефекти Керра і Поккельса), магнітооптичні (ефект Фарадея), при використанні яких відбувається фазова модуляція світла з наступним перетворенням її в амплітудну модуляцію.

Мета досліджень: проаналізувати принцип роботи поляризаційних модулаторів, порівняти їх технічні характеристики.

Метод дослідження – теоретичний.

Встановлено, що за допомогою електрооптичних та магнітооптичних ефектів змінюють поляризацію світла для подальшої його модуляції. Для поляризаційної модуляції світлового потоку доцільно використовувати комірки Фарадея.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОДУЛЯЦІЯ СВІТЛА, ЕЛЕКТРООПТИЧНИЙ ЕФЕКТ, МАГНІТООПТИЧНИЙ ЕФЕКТ, ПЕРЕДАЧА ІНФОРМАЦІЇ.

ABSTRACT

Malysh M.I., Mozghovyi O.V., Klochan A.Ye. Optical signal modulation methods. Visnyk National Transport University. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2024. – Issue 1 (60).

Various methods of optical signal modulation have been analyzed in order to increase the amount of information carried by a light beam. For light modulation, the effects of changing the refractive index of the

medium under the action of an external field have been proposed: electro-optical (Kerr and Pockels effects), magneto-optical (Faraday effect), when used, phase modulation of light occurs with its subsequent conversion into amplitude modulation.

Research objective: to analyze the principle of operation of polarization modulators, to compare their technical characteristics.

Research method – theoretical.

It has been established that using electro-optical and magneto-optical effects, the polarization of light is changed for its further modulation. For polarization modulation of the light flux, it is advisable to use Faraday cells.

KEY WORDS: LIGHT MODULATION, ELECTROPTIC EFFECT, MAGNETOPTIC EFFECT, INFORMATION TRANSMISSION.

АВТОРИ:

Малиш Микола Іванович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, e-mail: M_Malysh@ukr.net, тел. +380442846709, +380508257165, Україна, 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, к. 410, orcid.org/0000-0003-4532-0764.

Мозговий Олександр Васильович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, e-mail: mavimfto@gmail.com, тел. +380442846709, +380677732434, Україна, 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, к. 410, orcid.org/0000-0002-0797-8779.

Клочан Арсен Євгенійович, PhD, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, e-mail: varsenchuk@gmail.com, тел. +38(068)-352-81-26, Україна, 01101, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка 1, orcid.org/0000-0002-4225-9382.

AUTHORS:

Malysh Mykola I., PhD in Physical and Mathematical Science, associate professor, National Transport University, associate professor of the department of information analysis and information security, e-mail: M_Malysh@ukr.net, tel. +380442846709, +380508257165, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Boychuk str., 42, of. 410, orcid.org/0000-0003-4532-0764.

Mozghovyi Oleksandr V., PhD in Technical Science, associate professor, National Transport University, associate professor of the department of information analysis and information security, e-mail: mavimfto@gmail.com, tel. +380442846709, +380677732434, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Boychuk str., 42, of. 410, orcid.org/0000-0002-0797-8779.

Klochan Arsen Ye., PhD, associate professor, National Transport University, associate professor of the department of information analysis and information security, e-mail: varsenchuk@gmail.com, tel. +38(068)-352-81-26, Ukraine, 01101, Kyiv, Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka str. 1, of. 244-5 orcid.org/0000-0002-4225-9382.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Данчук В.Д., доктор фізико-математичних наук, професор, декан факультету Транспортних та інформаційних технологій, Київ, Україна.

Стрельчук В.В., доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна.

REVIEWER:

Danchuk V.D., doctor of sciences, professor, dean of the Faculty of Transport and Information Technologies, Kyiv, Ukraine.

Strelchuk V.V., doctor of sciences, professor, Leading scientific scientist, V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.