

# Твердотільна електроніка

УДК 621.372.41

DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.4.82290](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.4.82290)

## Тонкий напівпровідниковий НВЧ резонатор з електронним керуванням

Татарчук Д. Д., к.т.н., доц., OrcID [0000-0003-1171-6701](https://orcid.org/0000-0003-1171-6701)e-mail [dmitry.tatarchuk@gmail.com](mailto:dmitry.tatarchuk@gmail.com)Молчанов В. І., к.т.н., проф., OrcID [0000-0002-7937-4552](https://orcid.org/0000-0002-7937-4552)e-mail [profkom@kpi.ua](mailto:profkom@kpi.ua)Діденко Ю. В., к.т.н., OrcID [0000-0001-7305-8519](https://orcid.org/0000-0001-7305-8519)e-mail [yu.didenko@kpi.ua](mailto:yu.didenko@kpi.ua)Поплавко Ю. М., д.ф.-м.н., проф., OrcID [0000-0003-2012-4556](https://orcid.org/0000-0003-2012-4556)e-mail [yoplavko@gmail.com](mailto:yoplavko@gmail.com)Франчук А. С., OrcID <http://orcid.org/0000-0002-8350-564X>e-mail [franchuk\\_anton@ukr.net](mailto:franchuk_anton@ukr.net)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" [kpi.ua](http://kpi.ua)

**Реферат**—У статті показано можливість створення на основі тонких напівпровідникових резонаторів частот-носелективних пристроїв міліметрового діапазону довжин хвиль з електронним керуванням резонансною частотою. Описано методику розрахунку електродинамічних характеристик (а саме резонансних частот і добротностей) безкорпусних р-і-п діодів. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень та показано, що р-і-п діод з певним відношенням товщини до поперечних розмірів можна розглядати як тонкий напівпровідниковий резонатор Е-типу з електронним керуванням.

Бібл. 12, рис. 5, табл. 1.

**Ключові слова** — напівпровідниковий резонатор; електронне керування; резонансна частота; добротність; р-і-п діод

### І. ВСТУП

Інформаційні технології є невід'ємною частиною сучасного життя. Сфера їх застосування стає все більшою. Натепер – це не лише інтернет і засоби зв'язку, а і військові технології, засоби масової інформації тощо. У зв'язку з таким широким використанням постає проблема освоєння нових частотних діапазонів – міліметрового та субміліметрового, що приводить до необхідності розробки нового комунікаційного обладнання, здатного працювати у вказаних діапазонах частот. Якість роботи таких пристроїв значною мірою визначається якістю частотно селективних вузлів, таких як фільтри та фазообертачі. Однак створення таких вузлів на основі традиційних підходів стикається з низкою труднощів. У попередніх роботах [1, 2] нами було показано, що одним із можливих шляхів вирішення

цієї задачі може бути використання тонких діелектричних резонаторів. Але відомо, що діелектричні резонатори (ДР) за своєю природою є пасивними елементами [3, 4], тому створення на їх основі керованих фільтрів та фазообертачів вимагає або використання спеціальних додаткових механічних та електромеханічних пристроїв, або використання нелінійних діелектриків, напівпровідникових зосереджених або розподілених елементів [5 – 12]. Класифікацію методів керування характеристиками систем на основі діелектричних резонаторів наведено на рис. 1. Однак такі конструкції мають низку недоліків, а саме: порівняно великі габарити та масу, високі керувальні напруги, низьку добротність, низьку швидкодію, наявність гістерезису тощо.



Керування характеристиками ДР			
<i>Механічне</i>	<i>Електро-механічне</i>	<i>Електричне</i>	<i>Інші види керування</i>
1.Переміщення в полі ДР металічних нерезонансних керувальних елементів. 2. Переміщення в полі ДР діелектричних нерезонансних керувальних елементів. 3. Взаємне переміщення частин ДР. 4. Переміщення в полі ДР інших резонансних систем.	1.Використання електро-механічного керувального елемента як актюатора. 2. Використання електро-механічного керувального елемента як багато-функціонального пристрою.	1. Керування на основі зосереджених напівпровідникових елементів. 2. Керування на основі розподілених напівпровідникових елементів. 3. Керування на основі використання нелінійних діелектриків.	1.Магнітне керування на основі включень із феритових матеріалів 2. Магнітне керування на основі гіромагнітного резонатора. 3. Оптичне керування на основі напівпровідникових керувальних елементів. 4. Інші неперелічені види керування.
Комбіноване керування			

Рис. 1. Класифікація методів керування характеристиками систем на основі діелектричних резонаторів

Проведені нами дослідження показали, що в безкорпусних *p-i-n* діодах у міліметровому діапазоні довжин хвиль за відповідних розмірів можуть виникати резонансні коливання з достатньо високою добротністю. При цьому існує можливість керування їх резонансною частотою шляхом зміни прямого струму *p-i-n* діоду, що вказує на потенційну можливість створення на їх основі керування резонансних систем міліметрового діапазону довжин хвиль. Тому, метою даної роботи є дослідження резонансних систем з електронним керуванням частотою на основі *p-i-n* діодів.

II. РЕЗОНАНСНІ СТРУКТУРИ НА ОСНОВІ *P-I-N* ДІОДІВ

Для ефективного використання резонансних структур на основі *p-i-n* діодів необхідно встановити природу резонансних явищ у даних структурах. Для цього розглянемо їх структуру (рис. 2).

У структурі типового безкорпусного *p-i-n* діоду можна виділити такі області: металеві контакти (1), леговані *p*- та *n*-області з високою провідністю (2) та область власного (нелегованого) напівпровідника з низькою концентрацією носіїв заряду (3). Оскільки *i*-область набагато більша за інші, то саме вона визначає характер взаємодії *p-i-n* діода з електромагнітним полем.

З огляду на структуру *p-i-n* діоду можна зробити два основних припущення щодо природи його резонансних властивостей:

- резонанс відрізка мікросмужкової лінії передачі;
- діелектричний резонанс Е-типу у тонкому діелектричному резонаторі.

У першому випадку резонансні частоти такої структури можна розрахувати на основі добре відомих співвідношень для відрізків мікросмужкової ліній. У другому випадку задача розрахунку власних частот такого резонатора зводиться до розв'язання рівнянь Гельмгольца:

$$\nabla^2 \Gamma_i^e + \epsilon_i \mu_i k^2 \Gamma_i^e = 0;$$

$$\nabla^2 \Gamma_i^m + \epsilon_i \mu_i k^2 \Gamma_i^m = 0$$

за умови рівності нулю тангенціальних по відношенню до металевих контактів складових електричного поля. Також необхідним є виконання умови випромінювання Зомерфельда, що забезпечує однозначність розв'язку розглянутої задачі:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^\tau (dv/dr + jkv) = 0,$$

де  $\vec{\Gamma}^e, \vec{\Gamma}^m$  – електричний і магнітний вектори Герца відповідно,  $\epsilon_i$  – діелектрична проникність *i*-ої області резонансної системи,  $\mu_i$  – магнітна проникність *i*-ої області резонатора,  $k$  – хвильовий вектор,  $r$  – відстань,  $\tau = 1$  для тривимірного простору і  $\tau = 0,5$  для двомірного простору.

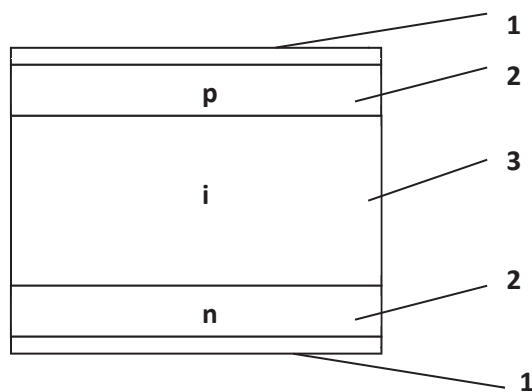


Рис. 2. Схематичне зображення структури *p-i-n* діоду



ТАБЛИЦЯ 1. РЕЗОНАНСНА ЧАСТОТА Й ДОБРОТНІСТЬ КРЕМНІСВИХ *p-i-n* ДІОДІВ

Поперечні розміри, мм	Товщина, мкм	Частота $f_0$ , ГГц			Добротність $Q_0$		
		відрізок лінії	тонкий ДР ( $f_0$ /мода)	експеримент	відрізок лінії	тонкий ДР	експеримент
$2,4 \times 1,3$	$\approx 250$	61,77	61,86/ E <sub>210</sub>	63,2	286	301	320
$1,3 \times 1,3$	$\approx 250$	74,02	69,1/ E <sub>210</sub>	66,7	316	330	310
$2,4 \times 1,2$	$\approx 250$	62,04	64,2/ E <sub>210</sub>	68,3	287	274	315
$1,4 \times 1,4$	$\approx 250$	70,31	65,1/ E <sub>210</sub>	63,1	300	294	350
$0,8 \times 0,8$	$\approx 250$	63,45	62,81/ E <sub>110</sub>	68,2	311	390	360

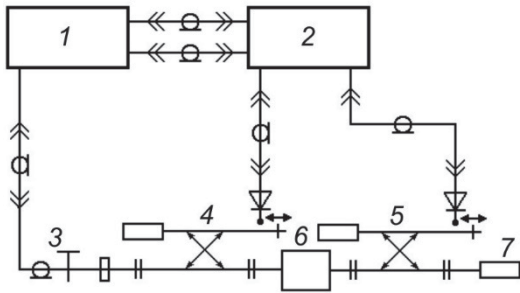


Рис. 3. Блок-схема вимірювальної установки: 1 – мікрохвильовий генератор; 2 – індикатор ослаблення; 3 – коаксіальний хвилевід; 4 – напрямлений відгалужувач "падаюча хвиля"; 5 – напрямлений відгалужувач "відбита хвиля"; 6 – блок із вимірювальним зразком; 7 – короткозамикач

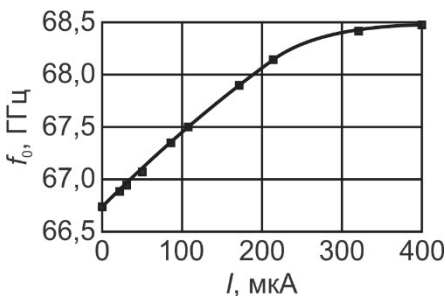


Рис. 4. Залежність резонансної частоти *p-i-n* діода прямокутної форми (розміри 2,4x1,3 мм<sup>2</sup>) від прямого струму

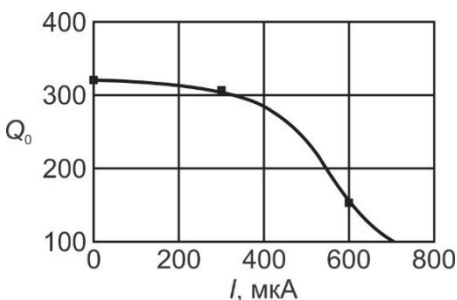


Рис. 5. Залежність добротності *p-i-n* діода прямокутної форми (розміри 2,4x1,3 мм<sup>2</sup>) від прямого струму

Для перевірки вищенаведених положень було проведено теоретичне та експериментальне дослідження резонансних характеристик *p-i-n* діодів у міліметровому діапазоні довжин хвиль. Результати

досліджень представлено в таблиці 1. На рис. 3 наведено схематичне зображення вимірювальної установки.

З наведених результатів видно, що безкорпусні *p-i-n* діоди можна розглядати як тонкі діелектричні резонатори з Е-типом коливальних елементів. Отримані експериментальні й теоретичні значення частот і добротностей свідчать про те, що безкорпусні *p-i-n* діоди можуть бути використані для створення резонансних систем. При цьому експериментально встановлено, що резонансні характеристики таких систем залежать від прямого струму *p-i-n* діода (рис. 4, 5).

Змінювання значення прямого струму *p-i-n* діода, використовуваного як резонансний елемент, у межах 0...400 мкА забезпечує зміну його резонансної частоти майже на 3% за незначного зменшення добротності (з 320 до 300). Таким чином, тонкий напівпровідниковий резонатор може бути використаний як основа для створення частотоселективних пристроїв НВЧ з електронним керуванням, таких як фільтри, фазообертачі тощо.

#### ВИСНОВКИ

Традиційні напівпровідникові структури, такі як *p-i-n* діоди, виявляють НВЧ діелектричні властивості та можуть бути використані в міліметровому діапазоні довжин хвиль як резонансні елементи.

Основною перевагою використання напівпровідникових резонансних структур є можливість реалізації електронного керування резонансною частотою, що значно збільшує їх функціональні можливості. Іншою перевагою є те, що процес виготовлення таких структур може базуватись на добре відпрацьованій планарній технології.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Tatarchuk, D. D., Molchanov, V. I., Didenko, Y. V. and Franchuk, A. S., «Tonkie dielektricheskie rezonatory millimetrovogo diapazona dlin voln [Thin Dielectric Resonators of the Millimeter Waves Range],» *Electronics and Communications*, vol. 20, no. 6(89), p. 6 – 10, 2015.  
DOI: [10.20535/2312-1807.2015.20.6.53334](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2015.20.6.53334)
- [2] D. D. Tatarchuk, «Chastotno-selektivnyie strukturyi na osnove tonkih dielektricheskikh rezonatorov [Thin Dielectric Resonators of the Millimeter Waves Range],» *Electronics and Communications*, vol. 21, no. 3(92), p. 6 – 9, 2016.  
DOI: [10.20535/2312-1807.2016.21.3.67181](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.3.67181)



- [3] Bezborodov, Y. M., Narytnik, T. N. and Fedorov, V. B., Mikrovolnovyye filtry na dielektricheskikh rezonatorah [Microwave filters on dielectric resonators], Kyiv: Tehnika, 1989, p. 184.
- [4] Ilchenko, M. Ye., Vzyatyshev, V. F. and Hassanov, L. G., Dielektricheskie rezonatory [Dielectric Resonators], Moscow: Radio i svyaz, 1989, p. 328.
- [5] Alekseichik, L. V., Beglov, V. I. and Hevorkyan, L. V., «Byistroe elektricheskoe upravlenie rezonansnoy chastotoy mikrovolnovogo dielektricheskogo rezonatora [Fast electric control of microwave dielectric resonator resonance frequency],» *Proc. of MEI*, no. 522, p. 75 – 81, 1981.
- [6] Alekseichik, L. V. and Plohih, N. A., «Problemy elektricheskogo upravleniya miniaturnymi dielektricheskimi rezonatorami i rezonansnymi strukturami [Problems of electrical control of miniature dielectric resonators and resonant structures],» in *Design of electronic devices on the dielectric waveguides and cavities: Sci.-Tech. Conf.*, 1988.
- [7] Prokopenko, Y., Poplavko, Y., Young Soo Yoo, Molchanov, V., Tatarchuk, D., "Bandpass and Band-Rejection Filters with Electrically Controlled Dielectric Resonators," in *Proceedings of Wireless Communication Conference*, 1997.  
DOI: [10.1109/WCC.1997.622272](https://doi.org/10.1109/WCC.1997.622272)
- [8] Molchanov, V. I., Tatarchuk, D. D., «Neodnorodnosti mikrovolnovykh dielektricheskikh struktur [Inhomogeneities in the microwave dielectric structures],» *Electronics and Communications*, vol. 13, no. 6(47), pp. 10-14, 2008.
- [9] E. R. Brown, "RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 11, pp. 1868-1880, November 1998.  
DOI: [10.1109/22.734501](https://doi.org/10.1109/22.734501)
- [10] S. Barker, G. M. Rebeiz, "Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wide-band switches," *IEEE Microwave Theory and Techniques Society*, vol. 46, no. 11, pp. 1881-1890, November 1998. DOI: [10.1109/22.734503](https://doi.org/10.1109/22.734503)
- [11] T. L. Willke, S. S. Gearhart, "LIGA micromachined planar transmission lines and filters," *IEEE Microwave Theory and Techniques Society*, vol. 45, no. 10, p. 1681-1688, October 1997.  
DOI: [10.1109/22.641711](https://doi.org/10.1109/22.641711)
- [12] Tatarchuk, D. D., Poplavko, Y. M., Kazmirenko, V. A., Borisov, A. V., Didenko, Y. V., «Kompozity na osnove dielektricheskikh materialov dlya mikrovolnovoy tekhniki [Composites based on dielectric materials for microwave engineering],» *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 59, no. 2, p. 33–43, 2016. DOI: [10.20535/S0021347016020047](https://doi.org/10.20535/S0021347016020047)

Надійшла до редакції 07 листопада 2016 р.

УДК 621.372.41

## Тонкий полупроводниковый СВЧ резонатор с электронным управлением

Татарчук Д. Д., к.т.н., OrcID [0000-0003-1171-6701](https://orcid.org/0000-0003-1171-6701)

e-mail: [dmitry.tatarchuk@gmail.com](mailto:dmitry.tatarchuk@gmail.com)

Молчанов В. И., к.т.н., OrcID [0000-0002-7937-4552](https://orcid.org/0000-0002-7937-4552)

e-mail: [profkom@kpi.ua](mailto:profkom@kpi.ua)

Диденко Ю. В., к.т.н., OrcID [0000-0001-7305-8519](https://orcid.org/0000-0001-7305-8519)

e-mail: [yu.didenko@kpi.ua](mailto:yu.didenko@kpi.ua)

Поплавко Ю. М., д.ф.-м.н., ., OrcID [0000-0003-2012-4556](https://orcid.org/0000-0003-2012-4556)

e-mail: [ypoplavko@gmail.com](mailto:ypoplavko@gmail.com)

Франчук А. С., аспирант, OrcID [0000-0002-8350-564X](https://orcid.org/0000-0002-8350-564X)

e-mail: [franchuk\\_anton@ukr.net](mailto:franchuk_anton@ukr.net)

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» [kpi.ua](http://kpi.ua)

**Реферат**—В статье показана возможность создания на основе тонких полупроводниковых резонаторов частотоселективных устройств миллиметрового диапазона длин волн с электронным управлением резонансной частотой. Описана методика расчета электродинамических характеристик (а именно резонансных частот и добротностей) бескорпусных  $p$ - $i$ - $n$  диодов. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований и показано, что  $p$ - $i$ - $n$  диод с определенным отношением толщины к поперечным размерам можно рассматривать как тонкий полупроводниковый резонатор  $E$ -типа с электронным управлением.

Библ. 12, рис. 5, табл. 1.

**Ключевые слова** — полупроводниковый резонатор; электронное управление; резонансная частота; добротность;  $p$ - $i$ - $n$  диод



# Thin microwave semiconducting resonator with electronic control

D. D. Tatarchuk, OrcID [0000-0003-1171-6701](https://orcid.org/0000-0003-1171-6701)

e-mail: [dmitry.tatarchuk@gmail.com](mailto:dmitry.tatarchuk@gmail.com)

V. I. Molchanov, PhD, OrcID [0000-0002-7937-4552](https://orcid.org/0000-0002-7937-4552)

e-mail: [profkom@kpi.ua](mailto:profkom@kpi.ua)

Yu. V. Didenko, PhD, OrcID [0000-0001-7305-8519](https://orcid.org/0000-0001-7305-8519)

e-mail: [yu.didenko@kpi.ua](mailto:yu.didenko@kpi.ua)

Yu. M. Poplavko, Dr.Sc. (Phys.-Math.), OrcID ., OrcID [0000-0003-2012-4556](https://orcid.org/0000-0003-2012-4556)

e-mail: [ypoplavko@gmail.com](mailto:ypoplavko@gmail.com)

A. S. Franchuk, postgraduate, OrcID [0000-0002-8350-564X](https://orcid.org/0000-0002-8350-564X)

e-mail: [franchuk\\_anton@ukr.net](mailto:franchuk_anton@ukr.net)

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» [kpi.ua](http://kpi.ua)

**Abstract**—The classification of methods for controlling microwave characteristics of systems based on dielectric resonators are described in the article. Their advantages and disadvantages are analyzed. The resonant properties of p-i-n diodes in millimeter wavelength range are experimentally investigated. It has been experimentally established that the resonant characteristics of such systems depend on the direct current of the p-i-n diode. Given the structure of the p-i-n diode, two basic assumptions can be made regarding the nature of its resonant properties: the resonance of a segment of a microstrip transmission line or a dielectric resonance of the E-type in a thin dielectric resonator. In the first case, the resonance frequencies of such structure can be calculated on the basis of well-known ratios for segments of microstrip lines. In the second case, the problem of calculating the eigenfrequencies of such resonator is reduced to the solution of the Helmholtz equations. The calculation of electrodynamic characteristics (namely, resonance frequencies and quality factors) of unpackaged p-i-n diodes as segments of a microstrip transmission line and as a dielectric resonator with an E-type oscillation is carried out. Based on the comparison of the results of theoretical and experimental studies, it has been shown that the p-i-n diode with a certain ratio of thickness to transverse dimensions can be considered as a thin semiconductor resonator with an E-type oscillations. The change in the direct current of the p-i-n diode used as a resonant element in the range of 0 ... 400  $\mu$ A provides a change in its resonance frequency by almost 3% for a slight decrease in the quality factor (from 320 to 300). Thus, the possibility of the creation of electronically controlled millimeter wavelengths of frequency-selective devices based on the thin semiconductor resonators (p-i-n diodes) is shown. The process of fabricating such structures may be based on well-worked out planar technology, which will enable the active and passive elements, as well as resonance circles, to be produced on a crystal in a single technological cycle.

References. 12, figures 5, Tables 1.

**Keywords** — semiconductor resonator; electronic control; resonant frequency; Q-factor; p-i-n diode

