

УДК 621.372.41

Д.Д. Татарчук, В.І. Молчанов, Ю.В. Діденко, А.С. Франчук

РЕЗОНАНСНІ ВЛАСТИВОСТІ *p-i-n*-ДІОДІВ У НВЧ ДІАПАЗОНІ

**Вступ.** У останні роки значна увага приділяється проблемі створення пристроїв міліметрового діапазону довжин хвиль (атенюаторів, фільтрів, фазообертачів, тощо). Зацікавленість в освоєнні короткохвильової частини міліметрового діапазону пов'язана із спробами створення інтегральних напівпровідникових структур, що включають лінію передачі НВЧ сигналу й елементи, які забезпечують керування цим сигналом: *p-i-n*-структури, структури на основі бар'єру Шотткі. Такі структури цікаві тим, що з одного боку вони мають досить високу діелектричну проникність і досить малі діелектричні втрати, а з іншого боку існує принципова можливість електронного керування параметрами таких систем [1, 2].

Проведені нами дослідження показали, що безкорпусні *p-i-n*-діоди, виготовлені на основі кремнію, мають у міліметровому діапазоні довжин хвиль досить високу добротність, достатню для виникнення резонансу. Це дозволяє використовувати їх як резонансні елементи при створенні пристроїв НВЧ з електричним керуванням резонансною частотою. Одночасно з широкими функціональними можливостями, привабливе також можливість виготовлення таких пристроїв на основі добре відпрацьованої напівпровідникової технології. Хоча дослідження в цій області ведуться досить інтенсивно, все ж дотепер недостатньо повно вивчено вплив зовнішніх факторів на електродинамічні властивості напівпровідникових резонансних структур, що приводить до необхідності подальшого їх вивчення.

Тому, метою даної роботи є дослідження резонансних систем з електронним керуванням частотою на основі напівпровідникових *p-i-n*-діодів.

**Резонансні напівпровідникові структури з електронним керуванням.** За своєю внутрішньою структурою (рис. 1) та характером взаємодії з електромагнітним полем такі структури є типовими представниками резонансних систем з *E*-типом коливань [3].

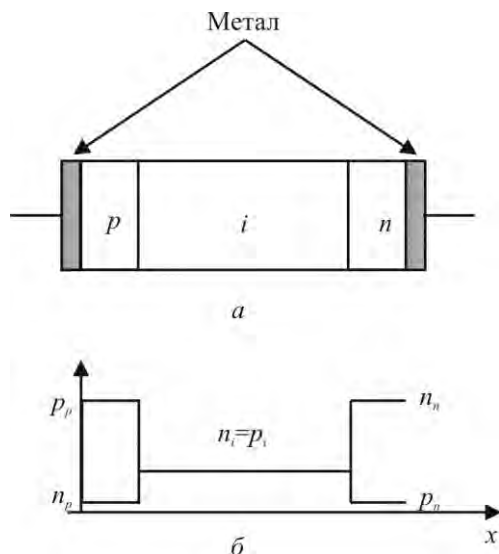


Рис. 1. Схематичне зображення структури ідеального *p-i-n*-діоду (а) та розподіл носіїв у ньому (б)

Як видно з рис. 1 у структурі *p-i-n*-діоду є область власного (нелегованого) напівпровідника з низькою концентрацією носіїв заряду (*i*-область). Електрофізичні властивості власного кремнію наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Електрофізичні властивості власного кремнію

Параметр	Значення
Діелектрична проникність у НВЧ діапазоні	11,6
Питомий опір, (Ом·м) за температури 20 °С у НВЧ діапазоні	$2,3 \cdot 10^5$
Тангенс кута діелектричних втрат за температури 20 °С у НВЧ діапазоні	0,0006 – 0,0025

З таблиці 1 видно, що власний кремній має досить високий питомий опір і низькі втрати на НВЧ, що робить принципово можливим створення на його основі резонансних систем НВЧ.

Розглянемо задачу про власні коливання для безкорпусного *p-i-n*-діоду (рис. 1, а). Математично ця задача зводиться до розв'язку рівнянь Гельмгольца [4, 5]:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{E}_i - \mu\mu_0\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}_i}{\partial t^2} &= 0; \\ \Delta \vec{H}_i - \mu\mu_0\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{H}_i}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

за граничних умов

$$[\vec{n}, \vec{E}_i] = 0 \tag{2}$$

на металічних контактах *p-i-n*-діоду, і за граничних умов

$$[\vec{n}, \vec{H}_i] - [\vec{n}, \vec{H}_0] = 0 \tag{3}$$

на бічних (неметалізованих) стінках, де  $\vec{E}_i, \vec{H}_i$  – вектори електричного й магнітного полів у внутрішніх областях *p-i-n*-діоду,  $\vec{H}_0$  – вектор магнітного поля в області, що межує з неметалізованими поверхнями *p-i-n*-діоду,  $\epsilon_i, \mu_i$  – відносні діелектрична й магнітна проникності внутрішніх областей *p-i-n*-діоду відповідно,  $\vec{n}$  – вектор нормалі до поверхні поділу.

Результати розрахунків та експериментальних досліджень резонансних систем на основі безкорпусних *p-i-n*-діодів наведено в таблиці 2. Типову частотну залежність коефіцієнту проходження прямокутного безкорпусного *p-i-n*-діоду наведено на рисунку 2.

Таблиця 2. Результати визначення резонансної частоти й добротності кремнієвих *p-i-n*-діодів

Поперечні розміри, мм	Товщина, мкм	Мода	Резонансна частота $f_0$ , ГГц		Власна добротність $Q_0$	
			теорія	експеримент	теорія	експеримент
1,3×2,4	≈ 250	E <sub>210</sub>	65,93	63,2	301	320
1,3×1,3	≈ 250	E <sub>210</sub>	68,7	66,7	330	310
1,2×2,4	≈ 250	E <sub>210</sub>	69,4	68,3	274	315
1,4×1,4	≈ 250	E <sub>210</sub>	66,04	63,1	294	350
0,8×0,8	≈ 250	E <sub>110</sub>	67,3	68,2	390	360

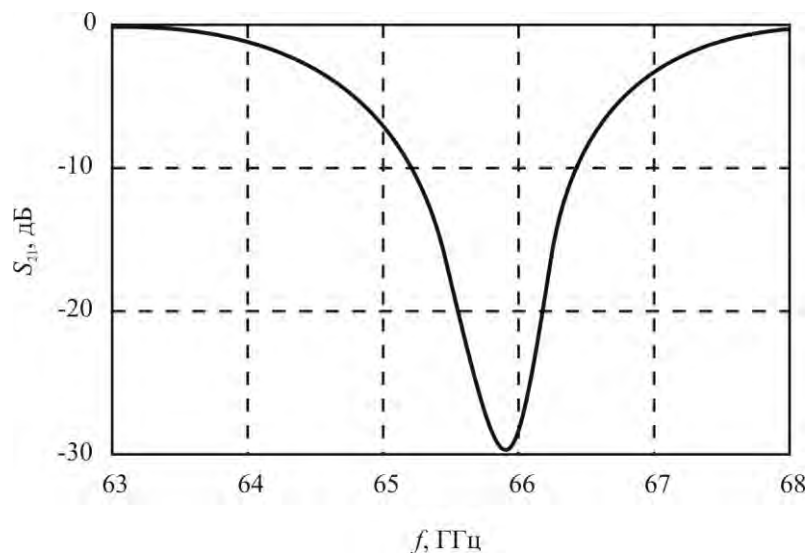


Рис. 2. Частотна залежність коефіцієнту проходження ( $S_{21}$ ) для безкорпусного кремнієвого *p-i-n*-діоду прямокутної форми розмірами 1,3×2,4 мм<sup>2</sup>

Отже, такі структури можна використовувати для створення резонансних систем. Крім того, проведені нами дослідження показали, що їх резонансна частота суттєво залежить від величини прямого струму (рис. 3).

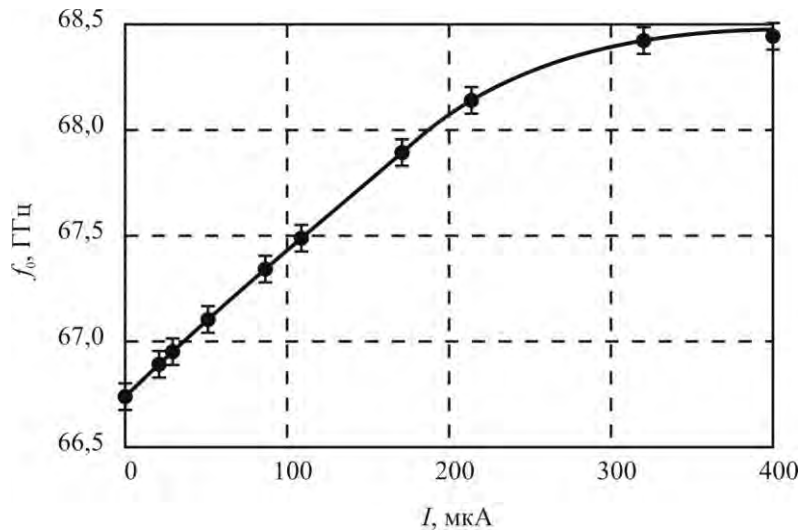


Рис. 3. Залежність резонансної частоти безкорпусного кремнієвого  $p-i-n$ -діоду прямокутної форми розміром  $1,3 \times 2,4 \text{ мм}^2$  від прямого струму, пропущеного через нього

Як видно з рисунку 3 частота резонансу зростає із збільшенням прямого струму через  $p-i-n$ -діод. Одночасно із зростанням частоти зменшується добротність структури (рис. 4).

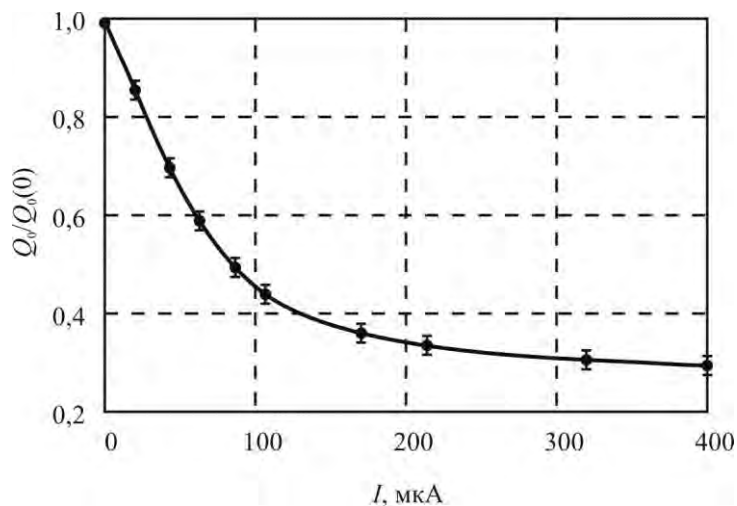


Рис. 4. Залежність нормованої добротності від прямого струму для безкорпусного кремнієвого  $p-i-n$ -діоду прямокутної форми розмірами  $1,3 \times 1,3 \text{ мм}^2$

Пояснити таку залежність резонансної частоти від прямого струму зміною ємностей  $p-i-n$ -діоду не вдається, оскільки за прямого включення ємності збільшуються зі збільшенням прямої напруги, а, отже, і зі збільшенням струму, що повинно приводити до зменшення резонансної частоти. Характер залежностей (рис. 3, 4) дозволяє зробити припущення, що у міліметровому діапазоні довжин хвиль така структура схемотехнічно може бути представлена у вигляді паралельного контуру із втратами (рис. 5).

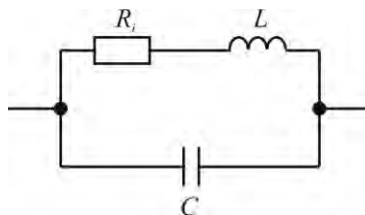


Рис. 5. Еквівалентна схема  $p-i-n$ -діоду

Резонансна частота ( $f$ ) і добротність ( $Q$ ) такого контуру описується виразами (4) і (5):

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_i}{L}\right)^2}, \quad (4)$$

$$Q = R_i \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (5)$$

де  $L$ ,  $C$  – ємність та індуктивність  $p-i-n$ -діоду відповідно,  $R_i$  – опір  $p-i-n$ -діоду.

З виразу (4) видно, що до збільшення частоти приводить зменшення опору  $p-i-n$ -діоду, спричинене збільшенням інжекції носіїв заряду в  $i$ -область за збільшення прямого струму. Таким чином у першому наближенні збільшення резонансної частоти за збільшення прямого струму  $p-i-n$ -діоду можна пояснити сумарною дією двох конкуруючих процесів: зменшення опору  $p-i-n$ -діоду та збільшенням його ємностей за збільшення прямого струму.

Одночасно із збільшенням частоти за зменшення опору  $p-i-n$ -діоду відбувається зменшення власної добротності  $p-i-n$ -діоду (рис. 4), що можна пояснити виходячи з виразу (5). Це обмежує можливий діапазон перестроювання частоти таких систем, однак проведені нами дослідження показали, що можна отримати перестроювання частоти більш ніж на 1,5 % за допустимого зниження добротності (рис. 3), що є достатнім для практичного використання.

**Висновки.** У  $p-i-n$ -діодах можливе виникнення високочастотного резонансу в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Резонансні частоти й власна добротність  $p-i-n$ -діодів суттєво залежать від величини прямого струму, що дозволяє реалізувати електронне перестроювання частоти більш ніж на 1,5 % за допустимого зниження добротності.

Отримані результати дають змогу зробити висновок про принципову можливість створення на основі  $p-i-n$ -діодів резонансних пристроїв НВЧ з електронним керуванням, що вказує на необхідність подальшого дослідження таких структур.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Молчанов В.І. Напівпровідникові резонансні структур із електронним керуванням. / В.І. Молчанов, В.М. Пашков, Д.Д. Татарчук, А.В. Єременко // Електроніка і зв'язь. – 2003. – №19. – С.17–19.
2. Мачулянський О.В. Селективні пристрої НВЧ на основі неоднорідних структур. / О.В. Мачулянський, Д.Д. Татарчук, Д.А. Шмигін // Технічна електродинаміка. – Вересень 2010 р. – Ч.3. – С. 159–160.
3. Молчанов В.І. Напівпровідникові комбіновані структури з діелектричним резонансом  $E$ -типу. / В.І. Молчанов, В.М. Пашков, Д.Д. Татарчук // Електроніка і зв'язь. – 2000. – №9. – С.55–58.
4. Татарчук Д.Д. Власні коливання прямокутних комбінованих діелектричних резонаторів з  $E$ -типом коливаний. / Д.Д. Татарчук // Електроніка і зв'язь. – 1999. – №7. – С.42–44.
5. Татарчук Д.Д. Добротность составных диэлектрических резонаторов с  $E$ -типом колебаний. / Д.Д. Татарчук // Електроніка і зв'язь. – 1998. – №5. – С.117–119.

ТАТАРЧУК Дмитро Дмитрович – к.т.н., доцент кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

– НВЧ електроніка, моделювання технологічних процесів електроніки.

МОЛЧАНОВ Віталій Іванович – к.т.н., доцент кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

– НВЧ електроніка, матеріали електронної техніки.

ДІДЕНКО Юрій Вікторович – інженер кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

– НВЧ електроніка, наноматеріали.

ФРАНЧУК Антон Сергійович – студент кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

– НВЧ електроніка.