

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК: 621.382: 681.586.776

В. С. Осадчук, д-р техн. наук, проф.;

О. В. Осадчук, д-р техн. наук, проф.;

С. В. Барабан, асп.

МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ ПІРОЕЛЕКТРИЧНОГО КОНДЕНСАТОРА

Запропоновано схему мікроелектронного перетворювача температури на основі піроелектричного конденсатора, вдосконалено електрофізичну модель піроелектричного конденсатора, виконано симуляцію роботи схеми перетворювача температури, проведено експериментальні дослідження роботи цього пристрою вимірювання температури.

Вступ

У сучасній термометрії застосовується велика кількість різноманітних методів вимірювання це пов'язано з відмінностями вимог для різних діапазонів температур, розмаїттям об'єктів вимірювання та вимог до них, особливостями характеристик робочих речовин, температуру яких вимірюють тощо. Особливе місце в сучасній термометрії посідає моніторинг температури довкілля, оскільки він необхідний як в багатьох сферах професійної діяльності людини, так і в побуті. Існує достатня кількість методів та засобів моніторингу температури довкілля [1], але, як відомо, досконалість не має меж. Автори пропонують перетворювач температури з частотним виходом на основі транзисторної структури з від'ємним опором і піроелектричним конденсатором. Перевагами сенсорів на основі транзисторних структур з від'ємним опором є велика точність вимірювання, економічність, висока завадостійкість і можливість передачі інформації на відстань [2]. Тому було поставлено за мету провести дослідження мікроелектронного перетворювача температури з частотним виходом і піроелектричним чутливим елементом.

Мікроелектронний перетворювач температури на основі піроелектричного конденсатора для моніторингу температури довкілля

На рис. 1 показана електрична схема мікроелектронного перетворювача температури на основі піроелектричного конденсатора для моніторингу довкілля. Робота пристрою базується на основі автогенератора, утвореного транзисторною структурою VT1 і VT2 і індуктивністю L.

Транзисторна структура складається із *p-n-p* біполярного транзистора і *n*-канального двохзатворного МДН-транзистора. Таке включення транзисторів забезпечує утворення між колектором біполярного транзистора і стоком польового транзистора від'ємного опору, який приводить до виникнення електричних коливань в контурі, утвореному послідовним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах колектор-стік біполярного транзистора VT1 і польового транзистора VT2 та індуктивним опором пасивної індуктивності L. В якості чутливого елемента використано піроелектричний конденсатор $C_{\text{пір}}$, який в схемі ввімкнено паралельно до транзисторної структури. Під дією температури довкілля піроелектричний

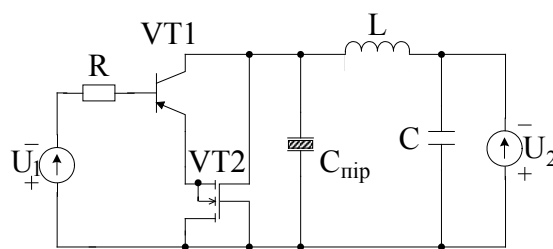


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного перетворювача температури на основі піроелектричного конденсатора для моніторингу довкілля

конденсатор змінює власну ємність за відомим механізмом [2], змінюючи при цьому значення ємності коливального контуру, утвореного послідовним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах колектор–стік біполярного транзистора VT1 і польового транзистора VT2 та індуктивним опором пасивної індуктивності L , а це викликає зміну резонансної частоти коливального контуру.

Для моделювання цього перетворювача температури необхідно спочатку змоделювати механізм роботи чутливого елемента, на який безпосередньо діє температура, а потім моделювати весь пристрій. На сьогодні існує велика кількість моделей піроелектричних конденсаторів [3, 4], але їх переважна більшість створена для використання піроконденсатора як елемента енергонезалежної пам'яті [3]. Таким чином, моделювання піроелектричного конденсатора в якості чутливого елемента для температурних перетворювачів є актуальним завданням.

Модель піроелектричного конденсатора

Аналізувати роботу піроелектрика в зовнішніх електричних колах навантаження і підсилення зручно за допомогою його еквівалентної схеми. Повна еквівалентна схема піроелектрика повинна враховувати весь комплекс електрофізичних властивостей. Для моделювання піроелектричного конденсатора використано модель на основі його еквівалентної схеми, яка складається з нелінійного конденсатора (C_{PE}), нелінійного резистора (R_{PE}), лінійного конденсатора (C_0), електростатичного джерела з е.р.с. (E) (рис. 2б). Нелінійні компоненти подано у вигляді функцій, що базуються на моделі, яка враховує підвищення і зниження поляризації [3] і гістерезисне розповсюдження [4]. Ці функції повинні містити залежність і від часу, і від напруги [5]. Електростатичне джерело з е.р.с. E має бути залежним від температури.

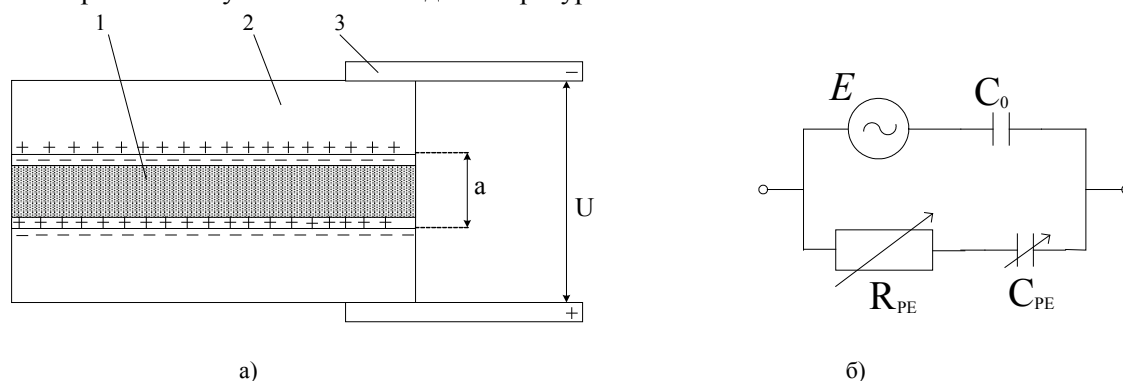


Рис. 2: а — ввімкнення піроелектричного конденсатора у зовнішнє коло; б — його еквівалентна схема

В піроелектричному перетворювачі (рис. 2а) полярний діелектрик використовується у вигляді пластини 1, покритої металічними електродами 2, до яких під'єднанні зовнішні виводи 3. Внаслідок електростатичної індукції в електродах і зовнішніх виводах потенціал зовнішніх виводів співпадає за знаком з приростом зв'язаного заряду на відповідній стороні піроелектрика. Піроелектрик володіє об'ємною провідністю.

Припустимо, що електричне поле в піроелектрику існує тільки в напрямку полярної осі. Тоді в будь-який момент часу баланс зарядів на поверхні піроелектрика описується рівнянням [5]:

$$D = \varepsilon E_{\text{пир}} S + \Delta Q_{\Sigma}, \quad (1)$$

де D — індукція вільних зарядів від будь-якого джерела, частіше провідності, $E_{\text{пир}}$ — напруженість електричного поля в піроелектрику; ΔQ_{Σ} — сумарний (від дії на різні властивості піроелектрика) приріст зв'язаного заряду.

Зі зміною температури, тобто при дії тільки на піроелектричні властивості $\Delta Q_{\Sigma} = \Delta Q_{\text{пир}} = \Delta P_S S = \gamma^{\sigma} \Delta T S$ (S — площа електродів, яка співпадає з площею поперечного зрізу піроелектрика, γ^{σ} — пірокоефіцієнт, що залежить від матеріалу діелектрика).

Припускаючи, що індукція D зумовлена тільки провідністю піроелектрика, для теплової дії з урахуванням $E_{\text{пир}} a = U$, де U — напруга на електродах піроелектрика, отримаємо:

$$U = -\frac{\gamma^{\sigma} \Delta T S}{C_0} = E, \quad (2)$$

де власна електрична ємність піроелектрика $C_0 = \frac{\epsilon S}{a} = \text{const}$.

Тепер проаналізуємо піроелектрик як систему, залежну від часу і прикладеної напруги, що на еквівалентній схемі (рис. 2б) показано нелінійними елементами C_{PE} і R_{PE} .

Ймовірність переходу системи від нижнього стану до вищого, $f \Delta V$ подана у вигляді

$$f_{\uparrow} = \frac{1}{1 + \exp[-(V_F - V_C)/V_0]} \cdot \frac{1}{V_0}, \quad (3)$$

де V_F — прикладена напруга між електродами, V_C — напруга збудження піроелектричного матеріалу, V_0 — тепла напруга, ΔV — покрокова зміна напруги за одиницю часу.

Рівняння (3) допускає, що поляризація піроелектричного матеріалу має тільки два стани, підвищення і зниження, і що динаміка поляризації має таку залежність:

$$p_{\uparrow} + p_{\downarrow} = 1. \quad (4)$$

Коли V_F перебуває в позитивному розгорнутому напрямку, поляризаційна динаміка підвищується (p_{\uparrow}). Для підвищення поляризації поляризаційна динаміка за одиницю часу обчислюється

$$\Delta p_{\uparrow} = (1 - p_{\downarrow}) f_{\uparrow} \Delta V. \quad (5)$$

Якщо рівняння (3) підставити в рівняння (5) і рівняння (5) проінтегрувати по початковій динаміці поляризації $p_{\uparrow i}$ до p_{\uparrow} , де V_i — початкова напруга, тоді:

$$p_{\uparrow} = 1 - (1 - p_{\uparrow i}) \frac{1 + \exp[(V_i - V_C)/V_0]}{1 + \exp[(V_F - V_C)/V_0]}. \quad (6)$$

Заряд підвищеної поляризації Q_{\uparrow} визначається:

$$Q_{\uparrow} = P_S (P_{\uparrow} - P_{\downarrow}) + C_0 V = P_S (2P_{\uparrow} - 1) + C_0 V, \quad (7)$$

де P_S — це поляризація насичення.

Ємність підвищеної поляризації $C_{PE\uparrow}$, яка є нелінійною ємністю на рис. 2б визначається

$$C_{PE\uparrow} = \frac{dQ_{\uparrow}}{dV} = 2P_S (1 - p_{\uparrow}) f_{\uparrow} + C_0. \quad (8)$$

Нарешті, нелінійний опір

$$R_{PE\uparrow} = \frac{\tau}{C_{PE\uparrow}}, \quad (9)$$

де τ — час релаксації системи.

Рівняння зниження поляризації можна отримати підстановкою рівняння (4) в рівняння (5). Функції нелінійних компонентів схеми можна знайти підстановкою рівняння (8) в (9). Для моделювання гістерезисних характеристик дані функції повинні містити залежність і від часу, і від напруги.

Використаємо цю модель піроконденсатора для моделювання перетворювача температури. Числові значення фізичних величин, присутніх у функціях (1), (4), (6), (7) візьмемо з таблиці [3, 4].

Параметри фізичних величин, використанні у моделюванні

Параметри	Фізична величина	Значення
V_C	Напруга збудження	2 В
P_S	Поляризація насичення	20 мкКл/см ²
C_0	Лінійна ємність	1,25 мкФ/см ²

Продовження табл.

Параметри	Фізична величина	Значення
V_0	Теплова напруга	0,5 В
τ	Час релаксації	10 нс
P_{\uparrow}	Початкова поляризація	0,5 мкКл/см ²
V_i	Початкова напруга	0 В
γ^{σ}	Пірокоефіцієнт	$1,9 \cdot 10^8$ Кл/(см ² · К)

Моделювання мікроелектронного перетворювача температури

Для моделювання даного пристрою скористаємось пакетом програм Orcad Family Release 9.2. В якості біполярного транзистора візьмемо транзистор марки BC857, а в якості польового транзистора — BF998. В процесі моделювання перетворювача температури стало зрозумілим, що для утворення від'ємного опору в транзисторній структурі VT1—VT2 (рис. 1) необхідно використати подільник напруги, який і під'єднано в коло першого затвору МДН-транзистора VT2. На рис. 3 показано схему досліджуваного пристрою. Піроелектричний конденсатор на рис. 3 поданий у вигляді еквівалентної схеми рис. 2б (на схемі в Schematics — це лінійний конденсатор C4 і нелінійні елементи: конденсатор C5 і резистор R4), параметри яких описуються функціями, виведеними з рівнянь (1), (4), (6), (7).

На рис. 4 показано низку вольт-амперних характеристик досліджуваного пристрою, отриманих внаслідок моделювання в Orcad Family Release 9.2. Знизу до верху на рис. 4 ВАХ змінюються в залежності від прикладеної напруги керування V1 — нижня характеристика знята при V1 = 1,5 В, далі напруга керування збільшувалась на 0,5 В до верхньої характеристики, яка була знята при V1 = 3,5 В.

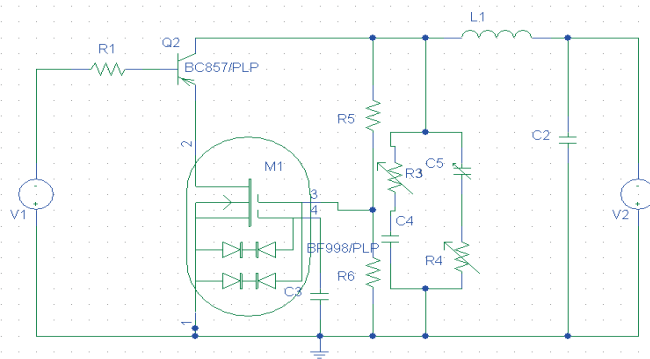


Рис. 3. Схема перетворювача температури, складена в Schematics

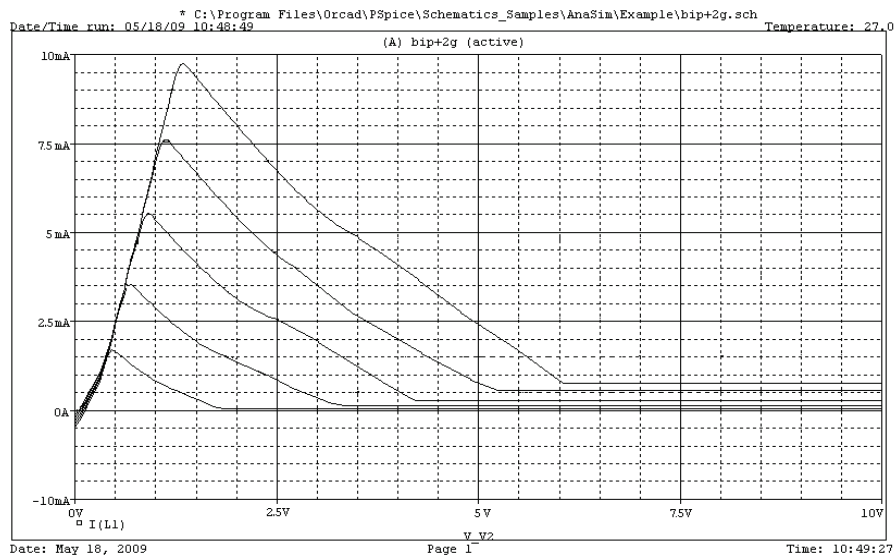


Рис. 4. ВАХ перетворювача температури з різними значеннями напруги керування

На рис. 5 показано залежність зміни вихідного струму з часом досліджуваного перетворювача температури, отриману в програмному середовищі PSpice.

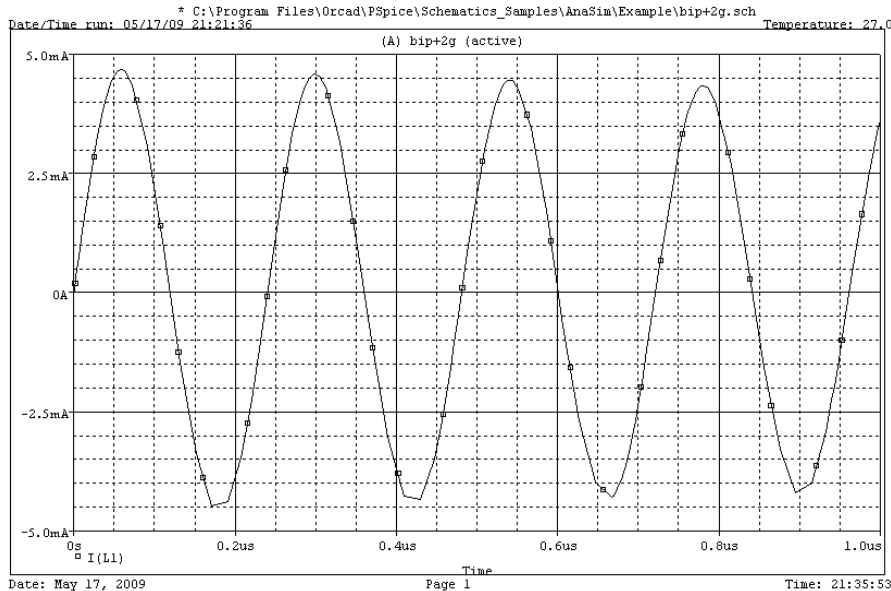


Рис. 5. Залежність зміни вихідного струму з часом перетворювача температури, отримана в PSpice

Таким чином, моделювання перетворювача температури для моніторингу довкілля (рис. 1) в Orcad Family Release 9.2 показало можливість створення на практиці цього пристрою і, завдяки проведеному моделюванню, стало зрозумілим, яку елементну базу краще використовувати.

Експериментальні дослідження

Для експериментальних досліджень було використано піроелектричний конденсатор, виготовлений з BaTiO_3 , розміром $15 \times 10 \times 1$ мм, ємністю 1,168 нФ. Замість МДН-транзистора BF 998 використано вітчизняний двохзатворний n -канальний польовий транзистор марки КП 327АІ, що дозволило відмовитись від використання подільника напруги R_5 , R_6 (рис. 3).

Блок-схема експериментальної установки для дослідження ВАХ перетворювача подана на рис. 6. Під час проведення експерименту використовувались джерела постійної напруги (ДПН) типу ВІП009, Б5-43, міліамперметр типу УТ70В, вольтметри типу В7-35, значення параметрів схеми: $R_1 = 1$ кОм, опір індуктивності L складав 7 Ом, $C_1 = 470$ нФ.

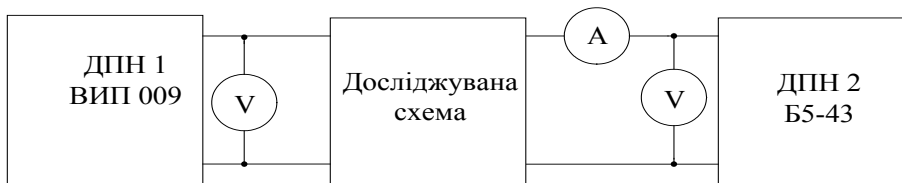


Рис. 6. Блок-схема вимірювальної установки для дослідження ВАХ перетворювача

На рис. 7 подані експериментальні ВАХ частотного перетворювача температури на основі БіМОН структури з ВО (BC 557В та КП 327АІ).

Блок-схема експериментальної установки для дослідження частоти генерації перетворювача від температури подана на рис. 8. Під час проведення експерименту використовувались: джерела постійної напруги (ДПН) типу ВІП009, Б5-43, міліамперметр типу УТ70В, вольтметри типу В7-35, частотомір електроннолічильний ЧЗ-35, осцилограф С1-93. Значення параметрів схеми: $R_1 = 1$ кОм, індуктивність $L = 94,6$ мкГн, $C_1 = 470$ нФ. Чутливий елемент досліджуваної схеми закріплюється в спеціально виготовлену контактну рамку і розміщується в печі. Вимірювання температури проводилось за допомогою переносного пірометра типу Смотрич-4ПМ1.

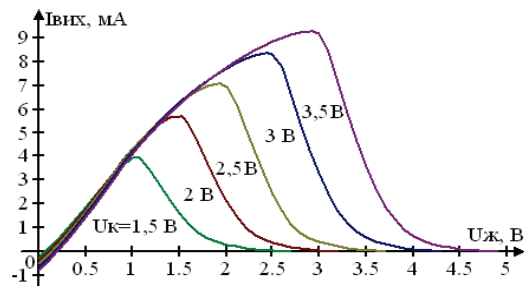


Рис. 7. Експериментальні ВАХ частотного перетворювача температури на основі транзисторів BC 557В та КП 327АІ

На рис. 9 подані експериментальні залежності частоти генерації у різних режимах живлення від температури навколишнього середовища. Як випливає з рисунка, оптимальним діапазоном робочих температури є інтервал від $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $160\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отже, експериментальні дослідження показали можливість використання мікроелектронного перетворювача температури на основі піроелектричного конденсатора для моніторингу довкілля.

1. Запропоновано оригінальну електричну схему мікроелектронного частотного перетворювача для моніторингу температури довкілля на основі піроелектричного конденсатора.

2. Запропоновано нову модель піроелектричного конденсатора в якості чутливого елемента для схеми перетворювача, на основі поєднання моделей, що враховують підвищення і зниження поляризації [3], гістерезисне розповсюдження [4], залежність від температури [5]. Цю модель піроконденсатора використано для моделювання роботи схеми перетворювача в пакеті програм Orcad Family Release 9.2, внаслідок чого було отримано низку ВАХ перетворювача, а також залежність зміни вихідного струму схеми з часом.

3. Проведено експериментальні дослідження перетворювача, завдяки чому отримано сімейство ВАХ і залежності частоти генерації від температури.

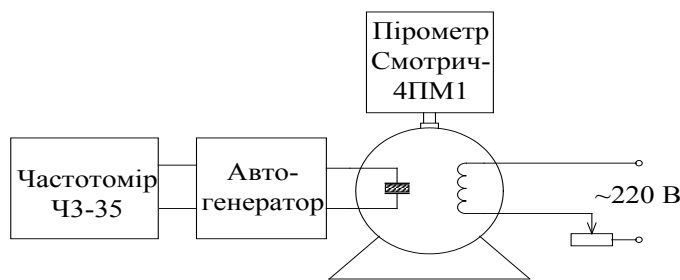


Рис. 8. Блок-схема вимірювальної установки для дослідження залежності частоти генерації від температури

Висновки

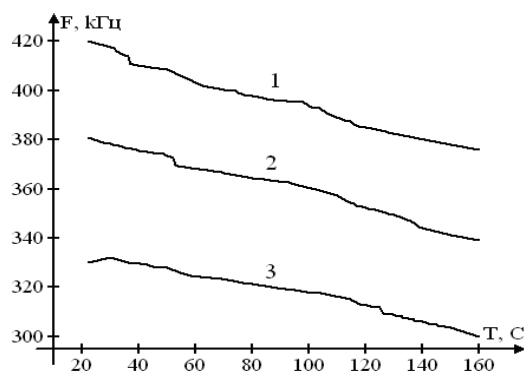


Рис. 9. Експериментальна залежність частоти генерації від температури для перетворювача на основі БіМОН структури з ВО і піроелектричним (BaTiO_3) чутливим конденсатором ввімкненим паралельно до транзисторної структури:
1 — $U_k = 1,5\text{ В}$; $U_{\text{ж}} = 4\text{ В}$; 2 — $U_k = 3\text{ В}$; $U_{\text{ж}} = 4\text{ В}$;
3 — $U_k = 2\text{ В}$; $U_{\text{ж}} = 2\text{ В}$

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гордов А. Н. Основы температурных измерений / О. М. Жагулло, А. Г. Иванова. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 296 с., ил.
2. Осадчук В. С. Аналіз методів вимірювання температури на основі піроелектриків / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан, О. М. Ільченко // Современные научные достижения — 2008 : матер. IV Міжнародної науково-практичної конференції. Т. 17. Технические науки. Электротехника и радиоэлектроника / Przemysl. Nauka i studia — С. 3—11.
3. A semi-empirical cad model of ferroelectric capacitor for circuit simulation / Kyunam Lim, Kuyhyon Kim, Songcheol Hong, Kywro Lee // Integrated Ferroelectrics / Volume 17 / Issue 1—4 September 1997. — P. 97—104.
4. Гаврилова Н. Д. Пироэлектричество / Н. Д. Гаврилова, М. Н. Данилычева, В. К. Новик. — М.: Сов. рад., 1989. — 154 с., ил.
5. Новик В. К. Пироэлектрические преобразователи / В. К. Новик, Н. Д. Гаврилова, Н. Б. Фельдман. — М.: Советское радио, 1979. — 176 с., ил.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Надійшла до редакції 26.10.09
Рекомендована до друку 1.12.09

Осадчук Володимир Степанович — професор кафедри електроніки;
Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри, **Барабан Сергій Володимирович** — аспірант.
Кафедра радіотехніки, Вінницький національний технічний університет