

2. Конструирование СВЧ-устройств и экранов/Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1983. 400 с.
3. Чернушенко А.М., Майбородин А.В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн/ Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.
4. Бокринська О.Я., Вунтесмері В.С., Кисляковський А.В. Ферромагнітний резонанс у техніці сантиметрових хвиль., «Техніка», Київ, 1966, 107 с.
5. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах: Пер. с нем./Под ред. В.Н. Сретенского. – М.: Гос. изд-во физико-математ. лит-ры, 1963. – 364 с.
6. L. Rothe, Experimentelle Ermittlung der magnetischen Feldverteilung auf einer Microstrip-Leitung mittels Storkorpermessungen, Vortage der 2. Internationalen Konferenz über Mikrowellenferrite, v.23, bis 27. September 1974 in Suhl/DDR, p.350-376.
7. Вунтесмери В.С. Детектирование на основе гальваномагнитных явлений в ферромагнитных пленках//Изв.вузов. Радиоэлектроника. 1976.- Т29, Вып.2. С.39-45.
8. Вунтесмери В. С., Ивкин П. В. Минимизация количества гальваномагнитных датчиков при измерении проходящей мощности в многомодовом волноводе. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 2002. - Т. 45, №8. - С. 32-35.

<p>Бульба О.П., Осипов А.М., Вунтесмери В.С.  <b>Исследование структуры поля в электродинамической системе методом магнитного зонда</b>          Рассмотрен метод магнитного зонда на основе ферромагнитного резонанса для исследования структуры электромагнитного поля в электродинамической системе. Обоснование метода проведено на примере электромагнитной волны <math>H_{10}</math> в прямоугольном волноводе. Проведено экспериментальное исследование структуры электромагнитного поля системы диэлектрический волновод на металлической основе.</p>	<p>Bulba O.P., Osipov A.M., Vuntsemeri Vol.S.  <b>Investigation of a structure field at electrodynamic system with method of magnet probe</b>          The method of a magnetic probe on the basis of a ferromagnetic resonance for research of structure of an electromagnetic field in electrodynamic system is considered. The substantiation of a method is lead on an example of electromagnetic wave <math>H_{10}</math> in a rectangular wave-guide. The experimental research of structure of an electromagnetic field of system a dielectric wave-guide on a metal basis is lead.</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

УДК 621.376.4

## ХВИЛЕВІДНИЙ ФАЗОВИЙ ДЕТЕКТОР, ПОБУДОВАНИЙ НА ТОНКОПЛІВКОВОМУ МАГНІТОРЕЗИСТИВНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Юрченко О.Д., Вунтесмері Вал.С.

*У роботі розглядається фазовий детектор призначений для роботи з сигналами НВЧ діапазону, який відрізняється від існуючих тим, що він виконаний не напівпровідникових елементах (діодах) а на тонких магніторезистивних плівках. Наводяться переваги застосування таких детекторів у хвилеводній техніці.*

### Вступ

У деяких галузях застосування, наприклад при роботі із сигналами НВЧ діапазону, використання напівпровідників не завжди є доречним. Існують і альтернативні, більш досконалі прилади, побудовані на ефектах іншої природи. Один з таких приладів – гальваномагнітний фазовий детектор – розглядається у даній роботі, наводяться його переваги і недоліки у порівнянні із традиційною напівпровідниковою електронікою.

### Огляд існуючих типів фазових детекторів

Фазовий детектор (ФД) призначений для здобуття вихідної напруги, пропорційній різниці фаз сигналу  $U_{\text{ex1}} = U_{m1} \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$  та опорного коли-

вання  $U_{\text{вх}2} = U_{m2} \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$ . Він застосовується у фазометричних пристроях, системах фазового автоматичного підстроювання частоти, при детектуванні фазомодульованих та фазоманіпульованих (ФМ) сигналів, встановлюють у корелометрах. ФД – це шестиполіусник (рис. 1а, рис. 2), що має два входи та один вихід, причому

$$U_{\text{вих}} = K_0 U_{m1} U_{m2} \cos \varphi \quad (1)$$

де  $\varphi = (\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)$ . Залежно від співвідношення частот  $\omega_1$  і  $\omega_2$  розрізняють два режими:  $\omega_1 = \omega_2, \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  (фазометрія) та  $\omega_1 \neq \omega_2, \varphi_1 = \varphi_2, \varphi = (\omega_1 - \omega_2)t$  (системи автопідстроювання) [2, 3].

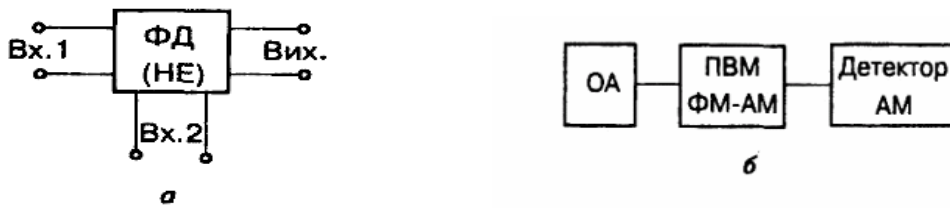
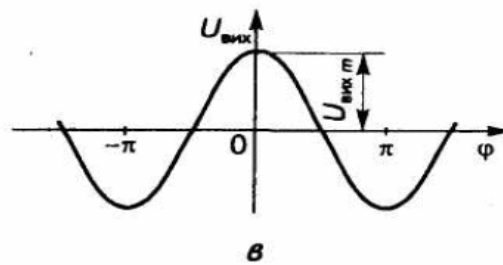


Рис.1.

а – узагальнена структурна схема фазового детектора; б – структурна схема векторомірного фазового детектора (ПВМ – перетворювач виду модуляції; АМ – амплітудна модуляція); в – залежність вихідної напруги від різниці фаз  $\varphi$ .



З (1) випливає, що ФД, як і перетворювач частоти, є перемножувачем. Різниця між ними в тому, що у перетворювачі частоти виділення вихідного сигналу здійснюється смуговим фільтром, а у ФД – фільтром нижніх частот (ФНЧ). Тому, для ФД можна використовувати всі види перетворювачів частоти, за умови заміни у вихідному колі смугового фільтра на ФНЧ. За типом перемножувачів розрізняють векторомірні, ключові ФД, та ФД на аналогових перемножувачах. З виразу (1) випливає, що вихідна напруга ФД залежить як від зсуву фаз  $\varphi$ , так і від амплітуд

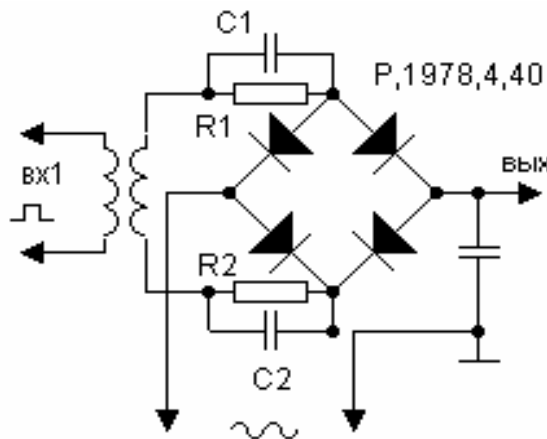


Рис. 2. Схема найпростішого ФД

вхідних сигналів  $U_{m1}$  та  $U_{m2}$ , тобто детектор є амплітудно-фазовим. Для переходу до ФД потрібно, як і в частотному детекторі, застосувати зовнішній або внутрішній обмежувач амплітуд (ОА). Структурну схему векто-

ромірного ФД з зовнішнім обмежувачем амплітуд показано на рис. 1б.

**ФД з аналоговим перемножувачем** – це ФД, що реалізує (1) за допомогою перемножувача (див. рис. 3,а).

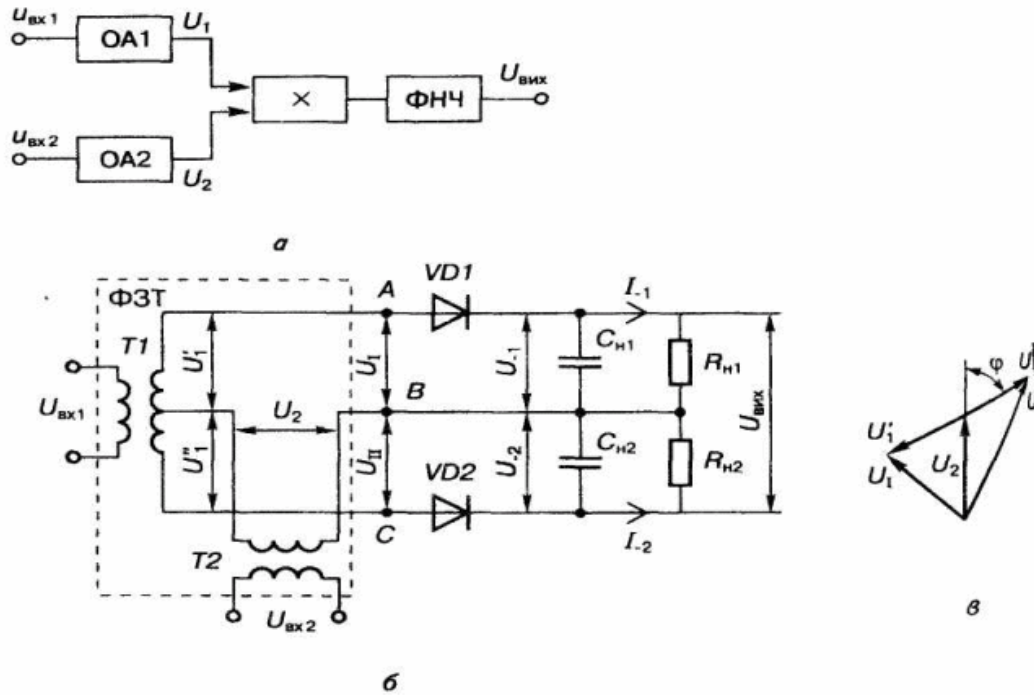


Рис. 3. ФД з аналоговим перемножувачем

**ФД векторомірний** – ФД, у якого фаза зсуву вхідних сигналів  $U_{вх1}$  та  $U_{вх2}$  перетворюється на амплітудну модуляцію високочастотних напруг (векторів)  $U_I$  та  $U_{II}$ , що надходять до амплітудного детектора (рис. 3 б,в). За типом перетворювача виду модуляції розрізняють однотактний, балансний і кільцевий ФД, побудовані аналогічно відповідним схемам перетворювачів частоти. Схему найпоширенішого балансного ФД показано на рис. 3 б, в. Кільцевий ФД може розглядатися, як з'єднання двох балансних, які працюють на одне навантаження.

**ФД ключовий** – ФД, вхідні сигнали якого комутують підсилювачі постійного струму, що працюють в ключовому режимі; частота та фаза комутації кожного підсилювача постійного струму збігаються з час-

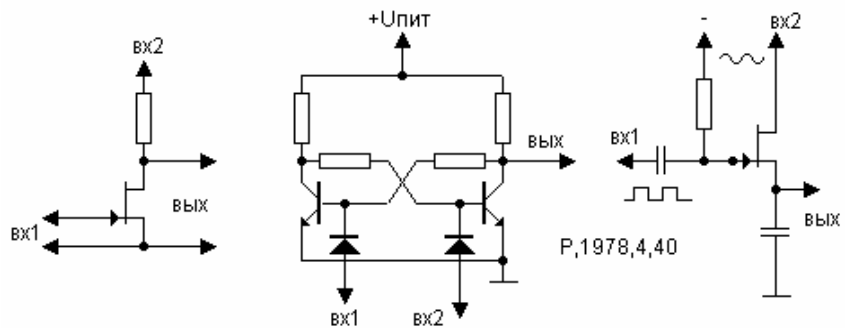


Рис. 4. Ключові фазові детектори

татами і фазами  $U_{\text{вх1}}$  та  $U_{\text{вх2}}$  відповідно. Формування імпульсів постійного струму здійснюється так, що після їх інтегрування вихідна напруга ФД виявляється пропорційною фазі зсуву  $\varphi$  (див. рис. 4). Ці схеми мають такі недоліки: у напівпровідникових елементах під час роботи виникає термо-ЕРС. Оскільки характеристики елементів не є ідентичними, то і похибки, які вносяться кожним з них неоднакові. Тобто при перемноженні сигналів ці термо-ЕРС не віднімаються і присутні у вихідному сигналі. Продетектований сигнал є квадратичним - у ньому присутні небажані складові, які потрібно видаляти.

### Гальваномагнітний перетворювач-детектор

На відміну від електричних та магнітних перетворювачів, у гальваногіромагнітних перетворювачах у загальному випадку є два незалежні входні ланцюги – електричний та магнітний, які пов'язані з електричною і магнітною складовими електромагнітних сигналів [1,2]. Якщо гальваногіромагнітний перетворювач (рис.5) з магніторезистивною сприйнятливістю  $\kappa_{ipl}$  поміщений у магнітне поле з напруженістю магнітного поля, що складає  $\vec{h} = \vec{h}_m \exp[j(\omega_h t + \psi^h)]$  і при цьому в плівці збуджується електричний струм, щільністю  $\vec{J} = \vec{J}_m \exp[j(\omega_j t + \psi^j)]$ , тоді в об'ємі перетворювача крім первісного електромагнітного поля буде існувати ще й перетворене поле через наявність параметричного детектування у феромагнітній плівці. Причому, низькочастотна складова цього поля на частоті, рівній різниці  $\omega_h - \omega_j$ , яка відповідає середньому за період НВЧ коливання напруженості електричного поля в плівці, дорівнює

$$E_{oi} = \frac{1}{2} \text{Re}(\kappa_{ipl} h_l J_p^*), \quad (2)$$

Крім того, у плівці існує й високочастотна складова перетвореного поля на сумарній частоті  $\omega_h + \omega_j$ , напруженість електричного поля якої дорівнює  $E_i = \frac{1}{2} \text{Re}(\kappa_{ipl} h_l J_p)$ . Оскільки в середовищі перетворення відбувається за рахунок лінійного параметричного процесу, то у спектрі електричної складової сумарного поля можна знехтувати комбінаційними складовими

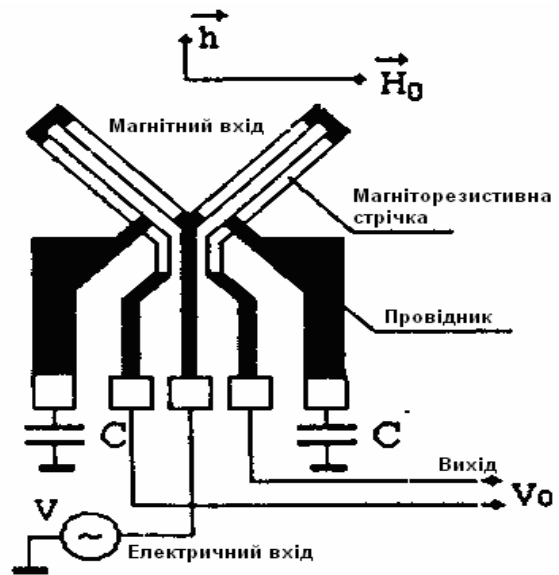


Рис. 5.

більш високих порядків.

Якщо плівка збуджується монохроматичною хвилею  $\omega_h - \omega_J$ , (2) набуває вигляду:  $E_{oi} = \frac{1}{2} \kappa_{ipl} G_{ip} \cos\left(\arctg \xi - \frac{\pi}{2} + \psi_{ipl}\right)$ , де  $G_{ip}$  – діадик (тензор),

утворений парою векторів  $\vec{h}$  та  $\vec{J}$ ;  $\xi$  – узагальнена розстройка феромагнітного поля відносно точки феромагнітного резонансу. При цьому виконується додавання добутків по всіх повторюваних індексах, тобто по  $pl$ -складових. Ця постійна складова визначається величиною узагальненого розладу відносно точки феромагнітного резонансу за рахунок зміни модуля та фази сприйнятливості  $\kappa_{ipl}$  і сумарним фазовим зсувом  $\Phi_{ipl}$ .

Розглянемо перетворення немонохроматичних сигналів, що створюються при різних видах модуляції несучої НВЧ сигналу або незалежними джерелами. Для того, щоб спростити запис виразів при аналізі, будемо вважати скалярними величинами магніторезистивну сприйнятливість і сигнали, що впливають. Нехай на гальваномагнітний перетворювач із частотною характеристикою магніторезистивної сприйнятливості  $\kappa(j\omega) = \kappa(\omega) \exp(j\psi_{\kappa(\omega)})$  впливають немонохроматичні сигнали  $h(t)$  і  $J(t)$ , що представляють собою модульовані НВЧ сигнали, які в загальному виді можна записати як

$$\left. \begin{aligned} h(t) &= h_m(t) \cos(\omega_0 t + \psi_{h(t)} + \psi_{h0}) \\ J(t) &= J_m(t) \cos(\omega_0 t + \psi_{J(t)} + \psi_{J0}) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де  $\omega_0$  – частота несучої,  $\psi_{h0}$  й  $\psi_{J0}$  – початкові фази коливань  $h(t)$  і  $J(t)$  складових;  $\psi_{h(t)}$  і  $\psi_{J(t)}$  змінювані в часі фази коливань. Поставимо у відповідність цим дійсним сигналам комплексні сигнали

$$\left. \begin{aligned} Z_{h(t)} &= h(t) + jh(t); \\ Z_{J(t)} &= J(t) + jJ(t), \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де  $h(t), J(t)$  – функції, сполучені по Гілберту відповідних функцій  $h(t), J(t)$ .

В показниковій формі вузькосмугові сигнали (3) записуються як

$$\left. \begin{aligned} Z_{h(t)} &= A_{h(t)} \exp(j\omega_0 t); \\ Z_{J(t)} &= A_{J(t)} \exp(j\omega_0 t), \end{aligned} \right\},$$

де  $A_{h(t)} = h_m(t) \exp[j(\psi_{h(t)} + \psi_{h0})]$  – комплексна амплітуда огинаючої напруженості НВЧ поля;  $A_{J(t)} = J_m(t) \exp[j(\psi_{J(t)} + \psi_{J0})]$  – комплексна амплітуда огинаючої щільності НВЧ струму в плівці.

Оскільки спектральна щільність аналітичного сигналу має такі власти-

вості, що  $Z_{h(j\omega)} = \begin{cases} 2h(j\omega) & \text{при } \omega > 0; \\ 0 & \text{при } \omega < 0, \end{cases}$  то змінну частину питомого опору перетворювача можна подати як

$$Z_{p(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \kappa(j\omega) Z_h(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (5)$$

Для подання  $Z_{p(t)}$  у показниковій формі перейдемо до нової змінної  $\Omega = \omega - \omega_0$  і враховуючи те, що магніторезистивна сприйнятливості має резонансну залежність і досить швидко зменшується при віддаленні від резонансної частоти, представимо її у формі  $\kappa(j\omega) = \kappa[j(\Delta\omega + \Omega)]$  де  $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_p$ ,  $\omega_p$  – частота феромагнітного резонансу.

Для позитивних частот спектральна щільність дійсного вузькосмугового сигналу пов'язана із спектральною щільністю комплексної амплітуди співвідношенням

$$h(j\omega) = \frac{1}{2} A_h [j(\omega - \omega_0)], \quad (6)$$

а  $Z_{h(j\omega)} = A_h [j(\omega - \omega_0)]$ . Тоді, з огляду на (5) і (6), одержимо

$$Z_{p(t)} = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\infty} \kappa[j(\Delta\omega + \Omega)] A_h(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega \right] \cdot e^{j\omega_0 t}. \quad (7)$$

Оскільки при  $\Omega = -\omega_0$  ( $\omega=0$ ) компоненти тензора магніторезистивної сприйнятливості практично дорівнюють нулю, то в інтегралі (7) нижню межу можна розширити до  $-\infty$  і в результаті одержимо

$$Z_{p(t)} = A_{p(t)} \exp(j\omega_0 t), \text{ де } A_{p(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \kappa[j(\Delta\omega + \Omega)] A_h(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega - \text{комплекс-}$$

на амплітуда змінної огинаючої частини тензора питомого опору магнітної плівки, який є інтегралом Фур'є від добутку спектральної щільності комплексної огинаючої НВЧ магнітного поля на частотну характеристику магніторезистивної сприйнятливості при заданій величині розладу  $\Delta\omega$ . Або заміняючи  $j\Omega$  на  $p$ , одержимо вираз у формі зворотного перетворення Ла-

пласа [3]  $A_{p(t)} = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} \kappa(j\Delta\omega + p) A_h(p) e^{pt} dp$ . Середнє за період несучого

НВЧ коливання значення огинаючої перетвореного поля, аналогічно (2) визначається як

$$E_0(t) = \frac{1}{2} \text{Re} [Z_p(t) Z_J^*(t)] \quad (8)$$

Використовуючи вираз для комплексних амплітуд огинаючих відповід-

них величин остаточно одержимо:

$$E_0(t) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [A_p(t) A_J^*(t)] \quad (9)$$

Таким чином, для визначення величини перетвореного поля для амплітудномодульованих сигналів необхідно визначити комплексні амплітуди огибаючих НВЧ струму і змінної частини питомого опору плівки, а потім скористатися виразом (8) або (9).

### **Висновки**

На відміну від напівпровідників, магніторезистивні пристрої забезпечують значно нижчий рівень теплових шумів (термо-ЕРС), є більш чутливими (чутливість більша на 3-5 порядків), у них ширший діапазон робочих частот, вони працюють на частотах до десятків ГГц. Окрім того магніторезистивні детектори забезпечують параметричне (а не квадратичне) детектування сигналу.

### **Література**

1. Гуревич А.Г. Магнітний резонанс в феритах и антиферромагнетиках. М. Наука, 1973. 573 с
2. Свалов А.В. Особенности магнитных свойств аморфных и многослойных ферромагнитных плёнок вблизи состояния магнитной компенсации. Екатеринбург, 2002.
3. Магнитные и магнитооптические свойства многослойных наноструктур ферромагнетик-полупроводник. Физика твёрдого тела, 2004. том 46, вып. 5.

<p>Юрченко А.Д., Вунтесмери Вал.С.  <b>Волноводный фазовый детектор, построенный на тонкопленочном магнито-резистивном преобразователе.</b>                  В работе рассматривается фазовый детектор, предназначенный для работы с сигналами СВЧ диапазона, который отличается от существующих тем, что он выполнен не на полупроводниковых элементах (диодах) а на тонких магнито-резистивных пленках. Приводятся преимущества таких детекторов.</p>	<p>Jurchenko O.D., Vuntsemeri Val.S.  <b>The waveguide phase detector, which are designed from thin magnetoresistive films.</b>                  In this paper author describes the phase detector designed to work with microwave frequency signals. This device differs from present nowadays in such way that it has been made not from semiconductor elements (diodes) but from thin magnetoresistive films. The author describes advantages of usage such detectors in waveguide technique.</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------