

Пространство факторов компенсации элементов имеет максимальный объем, если все факторы одного знака одинаковые и выполняется соотношение (20). При разнополярных факторах компенсации возможно значительное увеличение их объема, что позволяет снизить требование к элементной базе.

В связи с нелинейными свойствами выходных функций электронных аппаратов полной компенсации внешних воздействий, которой отвечает расположение вершин допусковых областей на гиперплоскостях области работоспособности при любых внешних воздействиях, достичь невозможно. Например, при изменении параметров под влиянием внешних воздействий на величину  $-0,2$ , выходная функция  $y = x_1/x_2^2$  может выходить за допускаемые значения до 8%. Это необходимо учитывать при организации процедур выбора элементов.

Полученные результаты являются базовыми при разработке алгоритмов выбора элементов для различных стратегий.

**Литература:** 1. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электрических цепей. М.: Сов. радио, 1973. 199с. 2. Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошевский В.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Сов. радио, 1973. 108с. 3. Цветков А.Ф. Методы расчета допусков в радиоэлектронной аппаратуре. Рязань: РРТИ, 1970. 131с. 4. Фридлендер И.Г. Расчеты точности машин при проектировании. Киев-Донецк: Высш. шк.,

1980. 184с. 5. Михайлов А.В., Савин К.С. Точность радиоэлектронных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 214с. 6. Кривошейкин А.В. Точность параметров и настройка аналоговых радиоэлектронных цепей. М.: Радио и связь, 1983. 136с. 7. Шило Г.М. Формування інтервальних моделей для обчислення допусків // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2002, №1. С.90-95. 8. Krischuk V., Shilo G., Gaponenko N. Software for Interval Analysis and Synthesis of Tolerances in CAD Systems // Proceedings of the International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. Foros. 2001. P.234-237. 9. Шило Г.М. Інтервали і інтервальні структури / Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2001. №2. С.121-125.

Поступила в редколлегию 15.03.2004

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Переверзев А.В.

**Шило Галина Николаевна**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры производства радиоаппаратуры ЗНТУ. Научные интересы: интервальная математика, моделирование, расчет допусков. Адрес: Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, тел. 698-249, E-mail: gshilo@zntu.edu.ua.

**Намлинский Антон Александрович**, аспирант кафедры производства радиоаппаратуры ЗНТУ. Научные интересы: системы автоматизации проектных процедур. Адрес: Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, тел. 698-249, E-mail: namlensk@zntu.edu.ua.

**Гапоненко Николай Прокофьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры производства радиоаппаратуры ЗНТУ. Научные интересы: конструирование электронных аппаратов. Адрес: Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, тел. 698-249.

УДК 621.382

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СВЧ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

*БАБЫЧЕНКО С.В., БОРОДИН Б.Г.,  
ГОРДИЕНКО Ю.Е.*

Предлагается метод измерения электропроводности и толщины высокоомных арсенидгаллиевых пластин (подложек) и эпитаксиальных или ионно-имплантированных слоев, основанный на определении относительного изменения добротности и уровня включения образца в поле цилиндрического СВЧ резонатора. Приводится схема измерительной установки и результаты экспериментальных измерений.

### Введение

На сегодняшний момент высокотехнологичные электронные приборы прочно вошли во все сферы жизнедеятельности человека. Полупроводниковые монокристаллы и эпитаксиальные пленки являются основой современной микроэлектроники и широко применяются в полупроводниковом приборостроении при изготовлении различных ин-

тегральных схем транзисторной логики, БИС и СБИС широкого назначения, в производстве диодных матриц, диодно-резистивных интегральных схем, измерительных преобразователей различных неэлектрических величин (давления, ускорения, вибрации, температуры). При изготовлении сотовых телефонов, высокоскоростной вычислительной техники, цифровых персональных коммуникационных систем, локальных сетей, спутников, широкополосных тюнеров, различных типов датчиков и сложных космических систем все шире применяются полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия [1]. При использовании современных методик создания подобных структур конечная стоимость изделия нередко оказывается завышенной ввиду того, что в цену каждого годного экземпляра закладывается стоимость отбракованных, а процент брака в среднем может составлять 30% от общего количества полупроводниковых изделий. Эти затраты снижаются путем применения эффективного технологического контроля качества полупроводниковых монокристаллов и структур. В последнее время налаживается производство отечественных арсенидогаллиевых слитков, пластин и структур для дальнейшего изготовления интегральных схем (ИС) и разнообразных датчиков на их основе. В связи с этим приобретает актуальность организация высокоэффективного контроля основных электрофизических параметров арсенидогаллиевых структур на различных

этапах технологического процесса их производства.

Одними из наиболее важных параметров, подлежащих такому контролю, являются удельная электропроводность и толщина исходных, чаще всего полупроводниковых, пластин арсенида галлия и эпитаксиальных или ионно-имплантированных слоев в этих пластинах.

Для измерения толщины полупроводниковых пластин (подложек) и эпитаксиальных пленок разработаны различные методы [2-8], среди которых следует выделить: эллисометрический [3,4], фотометод [5,6] (измерение на косом шлифе), емкостной метод [7,8], зондовый метод по виду ВАХ барьера металл-полупроводник [5-8]. Однако широкое распространение таких методов сдерживается либо из-за необходимости использования дорогостоящего или специального оборудования, либо из-за неудовлетворительной в условиях технологического контроля экспрессности [3-9].

Удельную электропроводность полупроводниковых пластин и эпитаксиальных пленок чаще всего измеряют при помощи зондовых методов (четырёхзондового, метода сопротивления растекания точечного контакта, Ван-дер-Пау, с использованием ртутных зондов и др.) [4-9]. Эти методы хорошо отработаны и апробированы, но при контроле высокоомных материалов, каким является полупроводящий GaAs, не обеспечивают необходимую точность.

Все более широкое применение в практике технологического контроля микроэлектроники находят СВЧ методы [2,5,10-14]. Их перспективность обусловлена тем, что СВЧ методы позволяют проводить многопараметровые измерения без разрушения образца и без изготовления специальных контактов. Это дает возможность осуществлять межоперационный контроль на разных этапах технологического процесса, а также входной и выходной контроль. При этом могут использоваться как волноводные, так и резонаторные измерительные преобразователи (ИП). Резонаторные ИП, как известно [5,11-13], позволяют обеспечить более высокую чувствительность. Так, в [12] для контроля удельной электропроводности слоев GaAs на полупроводящей подложке предложено использовать квазистатический СВЧ резонатор. Метод обеспечивает достаточно высокую точность в широком диапазоне контролируемого параметра, позволяет осуществлять измерения с хорошей локальностью. Однако он не дает возможности абсолютных измерений и требует проведения предварительной калибровки устройства.

### 1. Постановка задачи

Анализ последних работ в этом направлении [2-15] показывает, что весьма перспективным для измерения параметров плоских полупроводниковых образцов является ИП на основе цилиндрического резонатора с  $H_{012}$ -видом колебаний. При этом информативной оказывается зависимость его основных характеристик, таких, например, как добротность и резонансная частота, от электрофизических параметров образца и уровня включения

образца в поле резонатора [15]. Исследуемый образец размещается внутри такого резонатора, состоящего из двух соосных частей, перпендикулярно к его оси, полностью перекрывая поперечное сечение резонатора. Применение двух настроечных поршней позволяет изменять расположение образца в поле измерительного преобразователя в целях выбора наилучшего, с точки зрения получения максимального выходного сигнала, уровня включения образца. Однако до настоящего времени такой ИП для диагностирования высокоомных материалов не применялся, во-первых, ввиду его невысокой чувствительности к изменениям удельного сопротивления ( $\rho$ ) в области  $\rho \geq 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , а во-вторых — вследствие требований реальных производственных условий

Целью настоящей работы является обоснование возможности применения ИП на основе цилиндрического СВЧ резонатора с  $H_{012}$ -видом колебаний для контроля толщины и электропроводности полупроводящих арсенидогаллиевых подложек и эпитаксиальных пленок. Исследования при этом предполагается производить в области высоких значений уровня включения образца в поле резонатора.

На рис. 1 схематически приведен такой резонатор с образцом однослойной высокоомной структуры, какой может быть полупроводящая GaAs пластина.

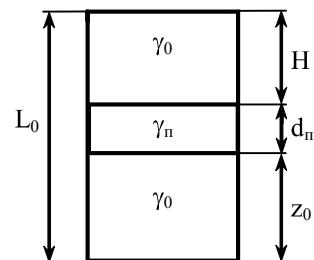


Рис. 1. Схематическая структура резонатора

Для одномодового приближения, когда рассматривается установившийся режим вынужденных колебаний указанного выше типа без возникновения дифракционных явлений и комбинационных колебаний, распределение электромагнитного поля в различных частях цилиндрического резонатора описывается известным характеристическим уравнением [11]:

$$\text{th}(\gamma_0 z_0) = -\frac{\gamma_0}{\gamma_n} \frac{\text{th}(\gamma_n d_n) + \frac{\gamma_n}{\gamma_0} \text{th}(\gamma_0 H)}{1 + \frac{\gamma_n}{\gamma_0} \text{th}(\gamma_n d_n) \cdot \text{th}(\gamma_0 \cdot H)}, \quad (1)$$

где  $\gamma_0, \gamma_n$  — комплексная постоянная распространения соответственно в свободной части резонатора и подложке;  $z_0, d_n, H$  — продольные размеры областей.

Постоянная распространения  $\gamma_n$  описывается следующим соотношением:

$$\gamma_n = \sqrt{-\omega^2 \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_n^* - \left(\frac{V_{01}}{R}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $\omega = \omega' + j \cdot \omega''$  – комплексная частота;  $R$  – радиус резонатора;  $\epsilon_n^* = \epsilon_0 \cdot \epsilon_n \cdot (1 + j \cdot \text{tg}(\delta_n))$  – комплексная диэлектрическая проницаемость;  $\text{tg} \delta_n$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

Численное решение уравнения (1) осуществляется относительно комплексной частоты  $\omega$ . При этом параметры образца считаются заданными и рассчитываются действительная и мнимая части частоты. Изменение резонансной частоты и добротности ИП при изменении уровня включения образца, фактически величины  $H$  и  $z_0$ , определяется при помощи соотношений

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{(\omega' - \omega_0)}{\omega_0}, \quad \frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{Q_0 - Q_n}{Q_0}, \quad (3)$$

здесь  $\omega_0$  – резонансная частота резонатора без образца;  $Q_0$  – собственная добротность резонатора;  $Q_n = \frac{Q_0 \cdot \omega'}{2 \cdot Q_0 \cdot \omega'' + \omega'}$  – нагруженная добротность резонатора.

## 2. Результаты расчета

На рис. 2 представлены некоторые результаты расчета зависимости относительного изменения добротности ( $\Delta Q/Q_0$ ) резонатора с полуизолирующей GaAs пластиной от уровня включения пластины в поле резонатора для различных значений ее электропроводности и толщины.

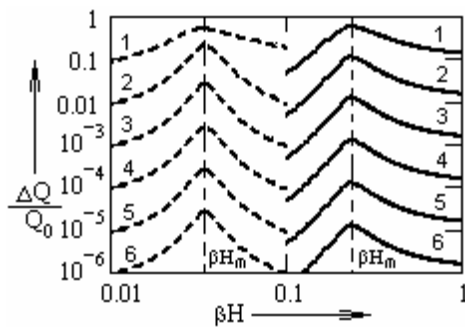


Рис. 2. Зависимости изменения добротности резонатора от уровня включения GaAs пластины: 1 –  $\sigma_n = 10^{-6} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ ; 2 –  $\sigma_n = 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ ; 3 –  $\sigma_n = 10^{-4} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ ; 4 –  $\sigma_n = 10^{-3} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ ; 5 –  $\sigma_n = 0,01 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ ; 6 –  $\sigma_n = 0,1 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$

Анализ приведенных зависимостей показывает, что кривая  $\Delta Q/Q_0 = f(\beta H)$  имеет четко выраженный максимум в точке  $\beta H_m$ , причем положение этого максимума не зависит от электропроводности пластины, а определяется значением ее толщины ( $\beta H_m = 0,229$ , для  $d_n = 100$  мкм (сплошная линия);  $\beta H_m = 0,014$ , для  $d_n = 500$  мкм (пунктирная линия)). Параметр  $\beta H$  количественно характеризует степень включения образца в поле ИП:

$$\beta H = \frac{2\pi\sqrt{1-\Theta}}{L_0} H, \quad (4)$$

где  $\Theta = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2$ ;  $\lambda_0$  и  $\lambda_{кр}$  – резонансная и критическая длина волны соответственно. Отсюда можно сделать вывод, что, измеряя экспериментально уровень включения  $\beta H_m$ , при котором зависимость  $\Delta Q/Q_0 = f(\beta H)$  принимает максимальное значение, можно определять толщину полуизолирующей пластины.

На рис. 3 представлен пример соответствующей градуировочной характеристики.

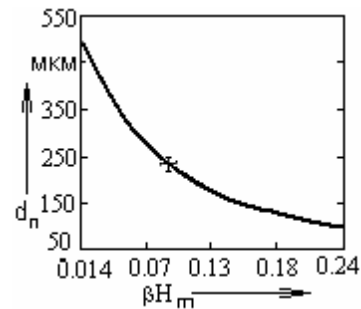


Рис. 3. Пример градуировочной характеристики для определения толщины GaAs пластины

В то же время абсолютное значение изменения добротности ( $\Delta Q/Q_0$ ) для конкретной толщины пластины однозначно определяется величиной ее электропроводности. Это означает, что можно предварительно установить по величине  $\beta H_m$  толщину пластины, затем – определить и ее электропроводность, измерив величину  $\Delta Q/Q_0$  при этом же уровне включения  $\beta H_m$ .

Пример градуировочной характеристики для определения электропроводности полуизолирующих пластин таким способом приведен на рис. 4.

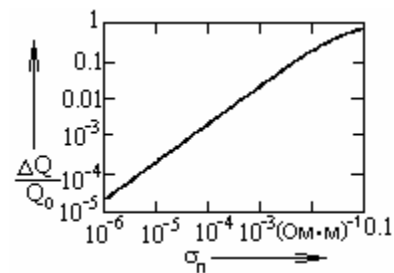


Рис. 4. Пример градуировочной характеристики для определения удельной проводимости GaAs пластины

Аналогичные результаты были получены и для двухслойных структур (эпитаксиальная пленка на полуизолирующей GaAs подложке  $\sigma_n = 10^{-6} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ ). Анализ результатов показал возможность определения толщины и электропроводности пленок при известных параметрах подложки. Полученные зависимости представлены на рис. 5, а, б. Величина  $\beta H_m$ , при которой зависимость  $\Delta Q/Q_0 = f(\beta H)$  имеет максимум, не зависит от электропроводности пленки, а определяется ее толщиной. В то же время электропроводность пленки определяет величину сигнала  $\Delta Q/Q_0$ .

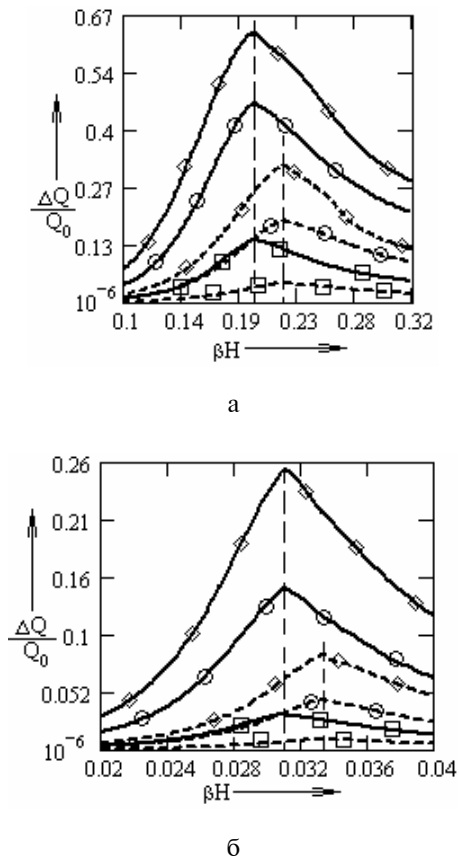


Рис. 5. Зависимости изменения добротности резонатора от уровня включения подложки с эпитаксиальным слоем: а –  $d_{пл} = 100\text{мкм}$ ; б –  $d_{пл} = 400\text{мкм}$

	$d_{пл}, \text{мкм}$	$\sigma_{пл}, (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$		$d_{пл}, \text{мкм}$	$\sigma_{пл}, (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$
↔	4	1	↔	15	1
⊖	4	0,5	⊖	15	0,5
⊞	4	0,1	⊞	15	0,1

Двухпараметровый контроль эпитаксиальных пленок на полуизолирующих подложках можно осуществлять при помощи аналогичных градуировочных характеристик, представленных на рис. 3,4. Пример градуировочной зависимости для определения электропроводности пленок приведен на рис. 6 ( $\sigma_{пл} = 10^{-6} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ ,  $d_{пл} = 10\text{мкм}$ ).

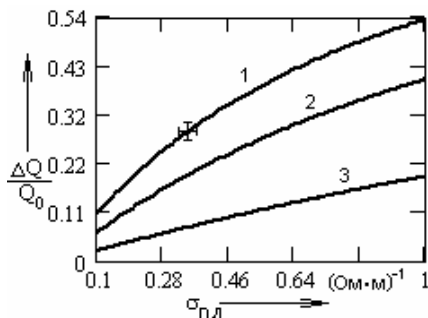


Рис. 6. Пример градуировочных характеристик для определения удельной проводимости эпитаксиальных слоев: 1 –  $d_{пл} = 100\text{мкм}$ ,  $\beta H_m = 0,20825$ ; 2 –  $d_{пл} = 250\text{мкм}$ ,  $\beta H_m = 0,07557$ ; 3 –  $d_{пл} = 400\text{мкм}$ ,  $\beta H_m = 0,03198$

### 3. Экспериментальная установка

Процедура измерения в этом случае может выглядеть следующим образом. Образец (полуизолирующая пластина или подложка с эпитаксиальным слоем) размещается в ИП, аналогичном описанному в [14,15]. Уровень включения образца плавно изменяется посредством перестройки настроечных поршней (координаты  $z_0$  и  $H$ ). Определяется уровень включения, при котором отношение  $\Delta Q/Q_0$  имеет максимальное значение. Затем с помощью соответствующих градуировочных характеристик по значениям уровня включения  $\beta H_m$  и  $\Delta Q/Q_0$  определяются толщина и электропроводность подложки или эпитаксиальной пленки.

Установка для экспериментальной проверки изложенных соображений приведена на рис. 7.

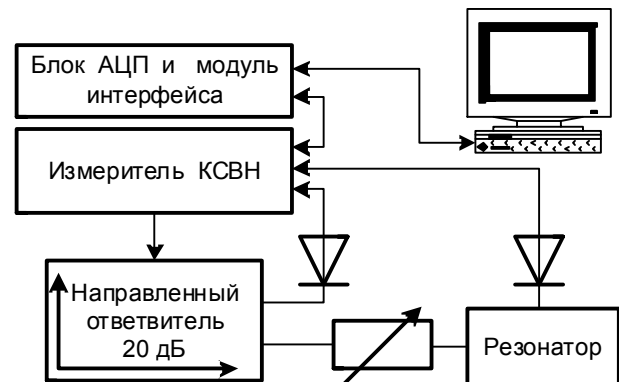


Рис. 7. Схема измерительной установки

Установка построена на базе панорамного измерителя КСВН и ослаблений серии Р2-67. Использование аналого-цифрового преобразователя и ПЭВМ позволяет автоматизировать процедуру измерения и определения искомых значений толщины и электропроводности. Сама процедура сводится к определению резонансной частоты объемного резонатора и его добротности по форме резонансной кривой [16], а также величины  $\beta H_m$ . На рисунках приведены результаты экспериментальных измерений на образцах GaAs пластин и эпитаксиальных пленок на полуизолирующей подложке. При этом собственная добротность резонатора  $Q_0 = 5000$ , а с образцом изменяется в зависимости от толщины и электропроводности подложки или эпитаксиального слоя в пределах от 3980 до 4999,99. Полученные результаты показывают удовлетворительное соответствие измеренных значений и паспортных данных образцов.

### Выводы

Таким образом, в работе показана возможность повышения верхнего предела электропроводности контролируемых полупроводниковых пластин при использовании цилиндрического СВЧ резонатора с  $H_{012}$  видом колебаний и двумя настроечными поршнями почти на два порядка (до  $10^6 \text{Ом}\cdot\text{м}$ ). Это обуславливает применимость предложенного мето-

да для диагностики образцов полуизолирующего GaAs. Данная методика измерений обеспечивает основные метрологические показатели на уровне не хуже ранее известных. Так, погрешность измерений толщины и электропроводности пластин не превышает 3%, а для случая измерения на эпитаксиальных пленках — не более 5%.

**Литература:** 1. *Арсенид* галлия в микроэлектронике: Пер. с англ./ Под ред. Н. Айнспрука, У. Уисмена. М.: Мир. 1993. 555 с. 2. *Аболтиньш Э.Э.* Неразрушающие методы контроля характеристик полупроводниковых слоев// RAU Scientific Reports. Computer Modelling & New Technologies. 1998. Vol. 2. P. 71-78. 3. *Роцин В.М., Чмырева О.Л., Лемешко С.В., Шевяков В.И.* Определение толщины сверхтонких пленок проводников и диэлектриков // Изв. вузов, Сер. Электроника, 2001. № 1. С. 100. 4. *Ковтонюк Н.Ф., Концевой Ю.А.* Измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1970. 430 с. 5. *Блад П., Ортон Дж. В.* Методы измерения электрических параметров полупроводников // Зарубежная электроника. 1991. Вып. 2. С. 3-49. 6. *Павлов Л. П.* Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высш. шк., 1987. 230 с. 7. *Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Стукалов О.М.* Метод оценки толщины ультратонких пленок // ПТЭ, 2003. №3. 8. *Батавин В.В.* Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев. М.: Сов. радио, 1976. 102 с. 9. *Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В.* Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с. 10. *Иващук А.В.* Измерение толщины эпитаксиальных пленок в арсениде галлия // ПТЭ, 1983. №2. С. 200-203. 11. *Бородовский П.А., Будыгин А.Ф.* СВЧ-контроль качества структур кремний на сапфире // Автотметрия. 2002. №2. 12. *Ханугин Е.Ю.,*

*Доронина Н.А., Соколов О.Ю.* Применение СВЧ резонантного метода для измерения электрофизических параметров структур GaAs // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1990. Вып 8. С.45-47. 13. *Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Рябухин А.И.* Фотомодуляционная СВЧ диагностика полупроводниковых структур // Радиотехника. 1995. Вып. 110. С.71-80. 14. *Гордиенко Ю. Е.* Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике многослойных структур // Радиотехника. Вып. 100. 1996. С. 253-260. 15. *Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Криворучко В.И.* Определение характеристик резонаторов со слоистым заполнением// Радиотехника. 1982. Вып. 60. С. 17-23. 16. *Вятчинин С.П.* Простой метод измерения высоких добротностей СВЧ резонаторов // ПТЭ. 1983. №4.

Поступила в редколлегию 07.01.2004

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Аркуша Ю.В.

**Бабыченко Сергей Васильевич**, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 702-93-62.

**Бородин Борис Григорьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: контроль параметров полупроводниковых материалов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 702-93-62.

**Гордиенко Юрий Емильевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 702-93-62.

УДК 621.385.6.029.6

## АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ С ВЧ ВОЛНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

*ФРОЛОВА Т.И., ЧУРЮМОВ Г.И., ИСАЕВА Е.Б.*

Описываются результаты математического моделирования энергетических характеристик двухкаскадного магнетрона при различных режимах его работы. Показывается, что применение новой конструкции прибора со скрещенными полями (двухкаскадный магнетронный автогенератор) дает возможность усовершенствовать эксплуатационные показатели (увеличить выходную мощность), а в перспективе реализовать новые режимы работы (модуляции и синхронизации) по сравнению с классическими приборами. Моделирование выполняется методом крупных частиц в многопериодном, одновиновом и нерелятивистском приближениях.

### 1. Введение

Механизм электронно-волнового взаимодействия в приборах со скрещенными электрическим и магнитным полями включает в себя взаимодействие электронного потока (замкнутого или разомкнутого) с

электромагнитной волной (или волнами) резонансной (или нерезонансной) замедляющей системой [1]. Такие магнетронные приборы можно рассматривать как классические или как традиционные. В настоящее время подробно разработана линейная аналитическая теория таких приборов [2, 3], а также решены многие вопросы нелинейного взаимодействия в них, включая исследования механизмов возбуждения паразитных и побочных колебаний [4-6], режимов многочастотного и многовинового взаимодействия [7, 8], ограничения эмиссии полем пространственного заряда [9] и неоднородности распределений статического электрического и магнитного полей [10], а также срывов колебаний и механизма ограничения усиления [11, 12], ограничивающих достижения приборами предельных значений выходных параметров (выходной мощности, КПД и др.) и конкуренции основного (рабочего) вида колебания с ближайшими низковольтным и высоковольтными видами колебаний [13].

Для изучения указанных выше вопросов нелинейного взаимодействия в приборах магнетронного типа наиболее строгим в постановке задачи и полным с точки зрения учета всех влияющих на процесс физических явлений является метод макрочастиц (Particle-in-Cell (PIC) method [14]). Основу данного метода составляет самосогласованная система уравнений для электромагнитного поля (уравнения Максвелла) и уравнения движения, описывающие поведение электронного потока. Такой подход традиционно