

В. Л. Хандамиров, С. В. Николаев,  
В. И. Литун

## ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА РЕШЕТКЕ ПОЛОСКОВЫХ ВИБРАТОРОВ

*Исследованы электродинамические модели печатных излучателей, выявлены зависимости изменения фазы коэффициента отражения от этих излучателей от емкостных реактивных нагрузок при различных периоде решетки, диэлектрической проницаемости материала, толщине подложки, ширине вибратора и расстоянии до экранирующей поверхности.*

**E-mail: victor\_kh@mail.ru**

**Ключевые слова:** фазированная антенная решетка, электрическое сканирование, отражательный элемент, микрополосковый вибратор.

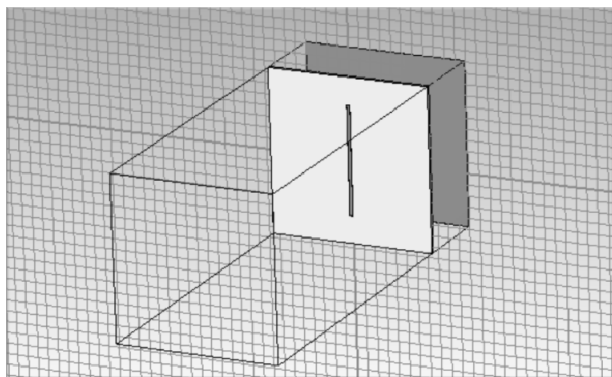
В антенной технике нашли широкое применение антенны с электрическим сканированием луча. Важное значение имеет улучшение массогабаритных характеристик их фазирующих элементов. В данной работе рассматриваются интегрированные фазирующие элементы, в которых излучатель совмещен с фазовращателем, выполненные на основе полосковых вибраторов с электронными коммутаторами, являющиеся достаточно компактными и легкими. Ранее в работе [1] были исследованы некоторые типы решеток проводников, нагруженных полными сопротивлениями, с использованием метода моментов. В статье [2] исследованы устройства, электродинамическая модель которых представляет собой бесконечную в двух направлениях периодическую решетку элементов. На эту решетку нормально падает плоская электромагнитная волна. Каждый элемент состоит из диэлектрической подложки, размещенной на идеально проводящем экране, на которой в свою очередь помещен полосковый вибратор. Размеры экрана и диэлектрической подложки совпадают с периодом расположения элементов, так, что у соседних элементов они вплотную примыкают друг к другу. В полосковый вибратор включены один или несколько электронных коммутаторов, моделью которых в разомкнутом состоянии является емкостное реактивное сопротивление. В качестве метода исследования был выбран численный метод, основанный на методе конечных элементов.

Однако в некоторых типах электронных коммутаторов с конструктивной точки зрения удобнее подавать на него управляющий сигнал со стороны экрана. Полосковый вибратор с коммутатором может быть размещен как на поверхности подложки, обращенной к экрану, так и на противоположной поверхности. По этой причине целесообразно рассмотреть электродинамическую модель устройства,

отличающуюся от модели, приведенной в работе [2] наличием воздушного зазора между подложкой и экраном.

Модель бесконечной антенной решетки с воздушным зазором, создается подобно модели без зазора, граничные условия, материал, период решетки примем аналогичными работе [2], добавив лишь еще один параметр модели — зазор между подложкой и экраном. Моделирование проводилось на частоте 10 ГГц, что не ограничивает полезность результатов, так как они легко могут быть перенесены в другой частотный диапазон.

Рассмотрим вначале случай, когда вибратор размещен на стороне подложки обращенной к свободному пространству. На рис. 1 показана модель ячейки решетки с вибратором.

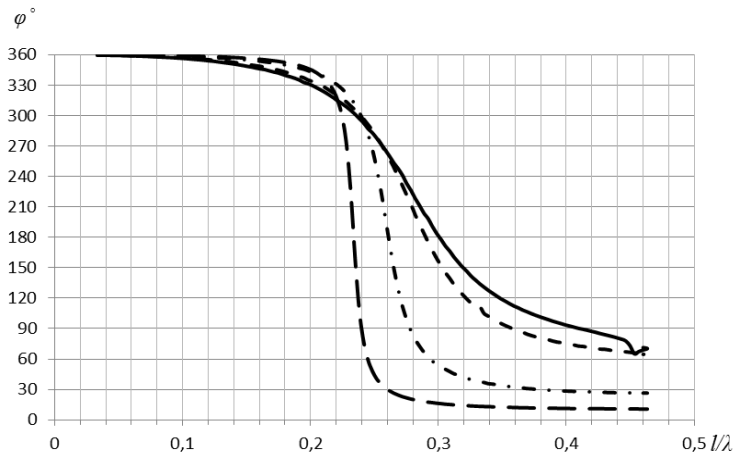


**Рис. 1. Модель ячейки решетки с воздушным зазором и вибратором**

На рисунке 2 показаны зависимости фазы коэффициента отражения от длины вибратора  $l$  для различных значений периода решетки  $T$ . Ширина вибратора  $a = 0,01\lambda$ , толщина подложки  $d = 0,01\lambda$ , материал подложки – кремний  $\varepsilon = 11,9$ , воздушный зазор от подложки до экрана  $h = 0,24\lambda$ .

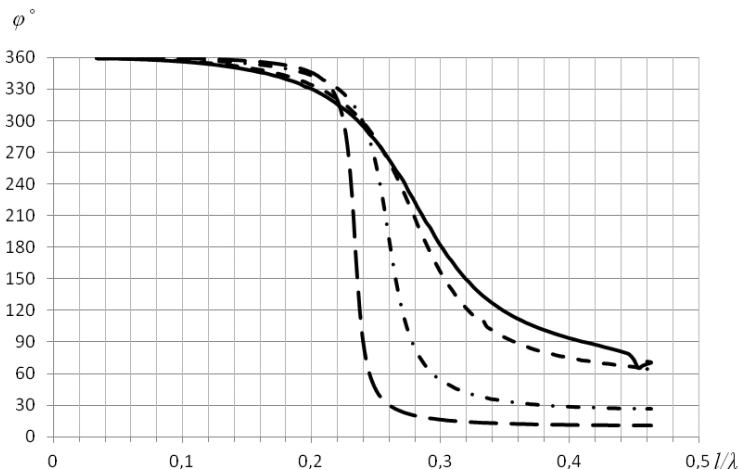
Как видно на рис. 2 при увеличении периода решетки от  $T = 0,4\lambda$  до  $T = 0,9\lambda$  крутизна кривых увеличивается и расширяется диапазон изменения фазы, а также, что при  $T = 0,4\lambda$  максимальное изменение фазы достигает  $\Delta\varphi = 289^\circ$ , при  $T = 0,5\lambda$   $\Delta\varphi = 295^\circ$ , далее диапазон значительно расширяется до  $\Delta\varphi = 334^\circ$  при  $T = 0,7\lambda$  и при  $T = 0,9\lambda$  уже составляет  $\Delta\varphi = 350^\circ$ .

Аналогичным образом получены зависимости при разных значениях толщины подложки для модели с вибратором, расположенным на стороне подложки, обращенной к экрану (рис. 3). Расчеты показывают, что при  $T = 0,4\lambda$  максимальное изменение фазы  $\Delta\varphi = 289^\circ$ , при  $T = 0,5\lambda$   $\Delta\varphi = 295^\circ$ , при  $T = 0,7\lambda$   $\Delta\varphi = 333^\circ$  и при  $T = 0,9\lambda$   $\Delta\varphi = 348^\circ$ .



**Рис. 2.** Зависимость фазы коэффициента отражения для различных значений периода решетки  $T$ :

—  $T = 0,4\lambda$ ; - - -  $T = 0,5\lambda$ ; - · - · -  $T = 0,7\lambda$ ; — — —  $T = 0,9\lambda$



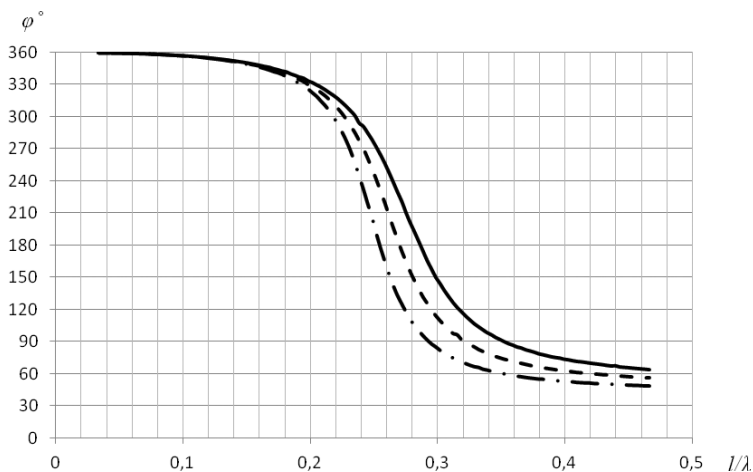
**Рис. 3.** Зависимость фазы коэффициента отражения от периода решетки для модели с вибратором, расположенным на обратной стороне подложки:

—  $T = 0,4\lambda$ ; - - -  $T = 0,5\lambda$ ; - · - · -  $T = 0,7\lambda$ ; — — —  $T = 0,9\lambda$

Из сравнения полученных результатов следует, что при малых толщинах подложки фазовый сдвиг практически не зависит от того, на какой стороне размещен вибратор.

При использовании реальных материалов их электрические характеристики могут иметь определенный разброс значений. Поэтому представляет интерес исследование влияния диэлектрической проницаемости на величину фазового сдвига вносимого устройством. На рис. 4 представлены зависимости вносимого фазового сдвига от длины вибратора для решетки с периодом  $T = 0,5\lambda$ , расположенной на под-

ложке толщиной  $d = 0,01\lambda$  и отстоящей от экрана на расстоянии  $h = 0,24\lambda$ , с шириной вибратора  $a = 0,01\lambda$ , относительной диэлектрической проницаемостью подложки  $\varepsilon = 12; 13,7; 15,5$ . На рисунке видно, что при увеличении значения  $\varepsilon$  возрастает крутизна фазовых кривых и увеличивается диапазон изменения фазы, который составляет  $296^\circ$  при  $\varepsilon = 12$ ,  $\Delta\varphi = 304^\circ$  при  $\varepsilon = 13,7$  и  $\Delta\varphi = 312^\circ$  при  $\varepsilon = 15,5$ .



**Рис. 4. Зависимость фазы коэффициента отражения от диэлектрической проницаемости материала:**

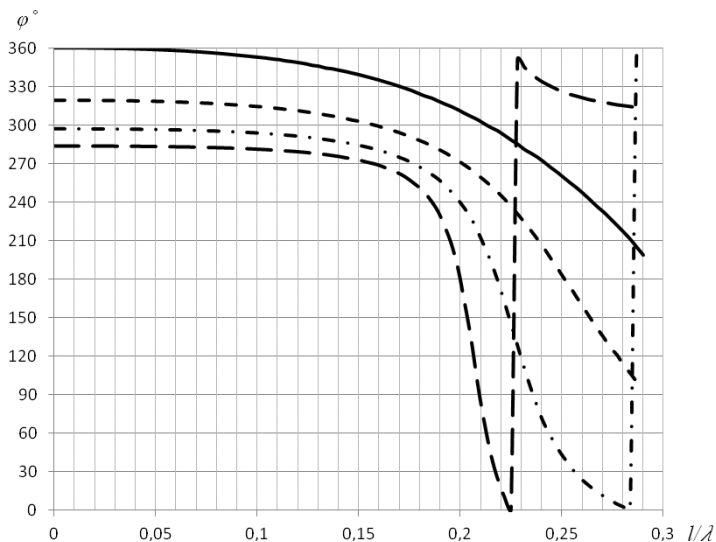
—— —  $\varepsilon = 12$ ; --- —  $\varepsilon = 13,7$ ; — · — —  $\varepsilon = 15,5$

Таким образом, из приведенных зависимостей следует, что изменение относительной диэлектрической проницаемости подложки на несколько процентов в сторону увеличения или уменьшения по сравнению со средним ее значением не приводит к значительному изменению фазовых характеристик рассматриваемой структуры.

Крутизна кривой изменения фазы и диапазон изменения зависят от толщины подложки, ширины вибраторов и расстояния до экрана. Влияние толщины подложки иллюстрирует рис. 5, на котором показана зависимость  $\varphi$  от длины вибраторов решетки с периодом  $T = 0,3\lambda$ , расположенной на подложке с различной толщиной  $d$ . Расстояние от верхней границы подложки до экрана  $h = 0,25\lambda$ , ширина вибратора  $a = 0,01\lambda$ . С увеличением толщины подложки крутизна кривых возрастает. Максимальная крутизна наблюдается при  $d = 0,04\lambda$ .

Ширина проводника вибратора, как и толщина подложки, определяет значение емкости щели вибратора, являющуюся элементом переключателя и, таким образом, влияющую на величину включаемой

мой сосредоточенной реактивности. Желательно выбрать ширину вибратора  $a$  и толщину диэлектрической подложки  $d$  как можно меньше, так как при этом можно добиться минимальной емкости щели, что устранит ее шунтирующее влияние на емкость включаемого в зазор вибратора дискретного коммутатора. При использовании оптоэлектронного ключа, изменяя ширину зазора при минимальных  $a$  и  $d$ , можно добиться большего диапазона изменения сосредоточенной реактивности.

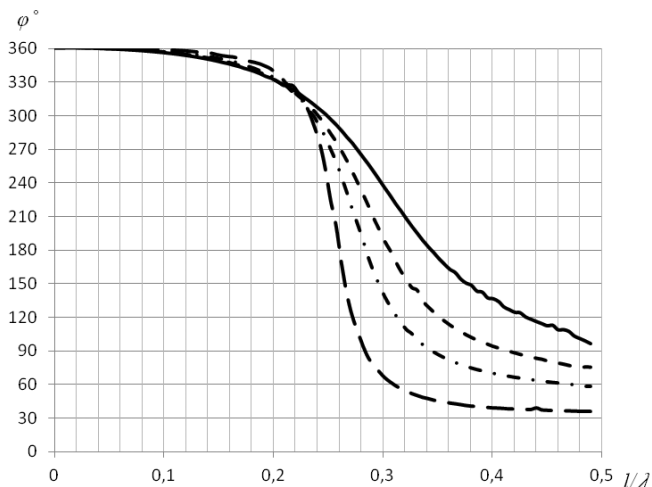


**Рис. 5. Зависимость фазы коэффициента отражения от толщины подложки:**  
 ———  $d = 0,01\lambda$ ; ----  $d = 0,02\lambda$ ; - · - · -  $d = 0,03\lambda$ ; — — —  $d = 0,04\lambda$

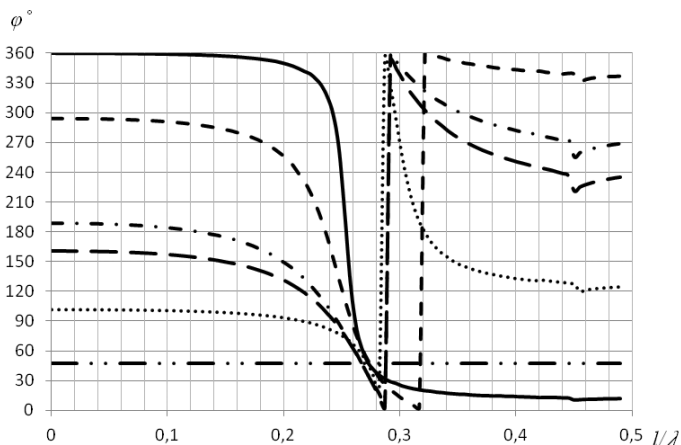
Увеличение ширины вибраторов приводит к уменьшению крутизны и диапазона изменения фазовых кривых  $\varphi$ . На рис. 6 приведены зависимости фазы коэффициента отражения от длины вибратора при различной ширине. Для исследования использовалась модель с периодом  $T = 0,5\lambda$ , толщина кремниевой ( $\epsilon = 11,9$ ) подложки  $d = 0,01\lambda$ , расстояние до экрана  $h = 0,25\lambda$ .

При проектировании период решетки  $T$  следует выбирать максимальным для заданного угла сканирования, так как уменьшение периода приводит к увеличению числа коммутаторов. На толщину подложки могут быть также наложены технологические ограничения, поэтому наиболее приемлемым для получения требуемых характеристик является соответствующий выбор (или подстройка) расстояния до экрана.

На рисунке 7 показаны зависимости фазы коэффициента отражения от значения воздушного зазора между решеткой и экраном. Толщина подложки неизменна —  $d = 0,01\lambda$ , период решетки  $T = 0,5\lambda$ , ширина вибраторов  $a = 0,01\lambda$ .



**Рис. 6. Зависимость фазы коэффициента отражения от длины вибратора:**  
 — — —  $a = 0,001\lambda$ ; - · - · -  $a = 0,01\lambda$ ; - - -  $a = 0,02\lambda$ ; — — —  $d = 0,04\lambda$



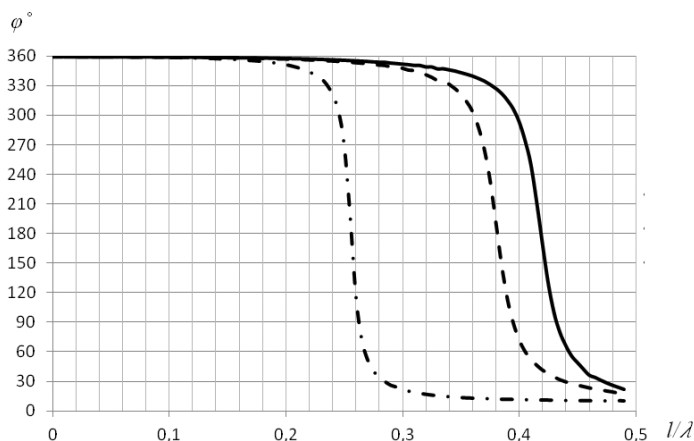
**Рис. 7. Зависимость фазы коэффициента отражения от воздушного зазора между решеткой и экраном:**  
 — — —  $h = 0,04\lambda$ ; - - -  $p = 0,009\lambda$ ; - · - · -  $h = 0,19\lambda$ ; — — —  $p = 0,24\lambda$   
 ······  $h = 0,39\lambda$ ; — · -  $h = 0,49\lambda$

Для относительно малых расстояний до экрана, например  $h = 0,04\lambda$ , фаза составляет  $0...346^\circ$ , но увеличение расстояния до  $h = 0,24\lambda$  приводит к уменьшению диапазона изменения фазы до  $286^\circ$ .

Приведенные зависимости дают возможность определить потенциальные возможности структуры.

Для управления фазой можно использовать коммутаторы, эквивалентная схема которых представляет собой емкостное реактивное сопротивление в разомкнутом состоянии и нулевое сопротивление в замкнутом. На рис. 8 представлены зависимости фазы от длины виб-

ратора для решетки с параметрами:  $T = 0,5\lambda$ ,  $d = 0,01\lambda$ ,  $h = 0,04\lambda$ ,  $a = 0,01\lambda$ ,  $\varepsilon = 11,9$  при различных значениях емкостного реактивного сопротивления. Штрих-пунктирная кривая характеризует решетку с замкнутыми вибраторами, т. е. без реактивного сопротивления, кривая 2 соответствует решетке с включенными в центре вибраторов реактивностями  $X_c = -1\,000$  Ом, а сплошная кривая —  $X_c = -10\,000$  Ом. Включение реактивных сопротивлений приводит к изменению фазы волны, отраженной от решетки вибраторов. Так, при длине вибраторов  $l = 0,31\lambda$  включение в их центральных точках сопротивления  $X_c = -1\,000$  Ом приводит к сдвигу фазы  $\Delta\varphi = 326^\circ$  относительно решетки с замкнутыми вибраторами, а включение  $X_c = -10\,000$  Ом при той же длине вибраторов обеспечивает сдвиг фазы  $\Delta\varphi = 331^\circ$ .



**Рис. 8. Зависимость фазы коэффициента отражения от сосредоточенной реактивности:**

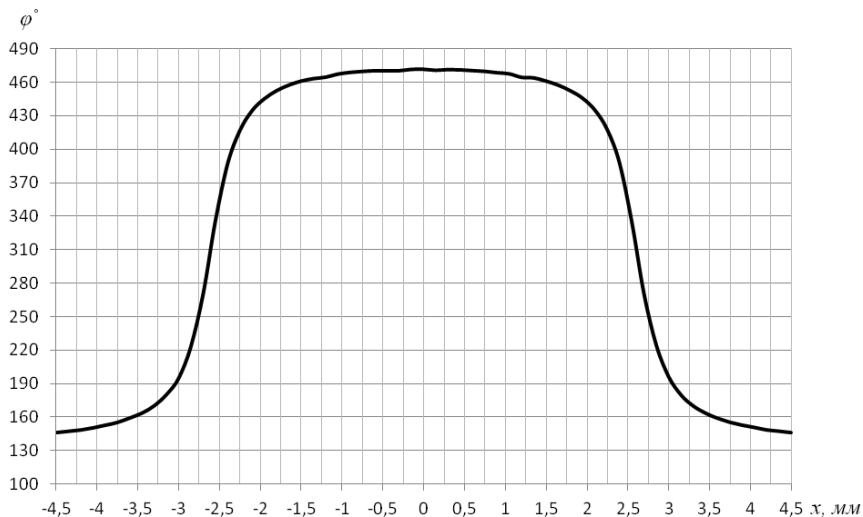
— · — · — 0; — — — — 1000 Ом; — — — — 10000 Ом

Как и в случае решетки без зазора [2], значительное смещение кривых происходит при увеличении модуля реактивных сопротивлений до 1 000 Ом. Дальнейшее же их увеличение не столь эффективно. Следовательно, когда даже большие значения  $X_c$  (например, 1 кОм) не позволяют достичь нужного сдвига фазы, то предпочтительнее изменить расстояние до экрана, а не увеличивать значение сопротивления. Можно также применить более толстую подложку, что увеличивает диапазон изменения значений  $\varphi$ .

Определив длину вибратора, при которой достигается максимальный фазовый сдвиг, можно указать места включения коммутаторов для дискретного переключения фазы.

С этой целью получена зависимость фазы коэффициента отражения от положения  $x$  реактивного сопротивления  $X_c = -1000$  Ом

(рис. 9). Значение  $x = 0$  мм соответствует центру полоска. По этой зависимости можно определить положение коммутатора на вибраторе, разрыв которого обеспечивает требуемый фазовый сдвиг. Однако такому способу управления присущ тот недостаток, что требуемое количество коммутаторов должно быть на единицу меньше количества фазовых состояний, т. е. достаточно велико. Представляется желательным получение требуемого количества состояний с меньшим количеством коммутаторов, например, четырех состояний с помощью двух коммутаторов.



**Рис. 9. Зависимость фазы коэффициента отражения от положения реактивного сопротивления**

Численным экспериментом было установлено, что для обеспечения управления фазой с помощью двух коммутаторов, в частности необходимо установить реактивные сопротивления  $-300$  и  $-500$  Ом на расстояниях  $x_1 = -1,5$  мм и  $x_2 = 1,1$  мм от центра вибратора соответственно. При эксперименте использовалась модель решетки с параметрами  $T = 0,5\lambda$ ,  $d = 0,01\lambda$ ,  $h = 0,04\lambda$ ,  $l = 0,31\lambda$ ,  $a = 0,01\lambda$ ,  $\varepsilon = 11,9$ . В результате при размыкании первого коммутатора фазовый сдвиг относительно фазы отраженной волны от замкнутого вибратора составил  $\Delta\varphi = 90^\circ$ , при размыкании второго коммутатора —  $\Delta\varphi = 180^\circ$ , а при совместном их размыкании —  $\Delta\varphi = 270^\circ$ .

Таким образом, проведенные расчеты показывают возможность управления фазой отраженных электромагнитных волн с помощью вибраторных структур, содержащих электронные коммутаторы. Вибраторы могут быть размещены на диэлектрической подложке над экраном. При этом между диэлектрической подложкой и экраном



может быть воздушный зазор, а вибратор может быть размещен как на стороне подложки обращенной к экрану, так и на стороне, обращенной к свободному пространству. Необходимо проведения дальнейших исследований по оптимизации параметров таких устройств особенно в части касающейся минимизации количества коммутаторов при заданном количестве фазовых состояний и уменьшения дискрета фазирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синюшин В. В., Тягунов В. А., Хандамиров В. Л. Характеристики рассеяния решеток проводников, нагруженных полными сопротивлениями. // Радиоэлектронные и лазерные приборы. Труды МГТУ. – М., 1990. – С. 198–212.
2. Хандамиров В. Л., Николаев С. В. Исследование фазирующих элементов на основе полосковых вибраторов с сосредоточенными реактивными сопротивлениями // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». – 2011. – № 12.

Статья поступила в редакцию 07.09.2012