Письма в ЖТФ, том 18, вып. 19 12 октября 1992 г.

01

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЛН С АКТИВНЫМИ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ

Т.Н. Вербицкая, В.В. Демехин, В.Г. Пономаренко

Характерным свойством процесса распространения волн различной природы в слоистых периодических структурах (СПС) является наличие зон отражения и зон прозрачности [1–3]. Их положение определяется параметрами СПС (толщинами слоев, плотностью, диэлектрической и магнитной проницаемостью и т. д.).

Изменение параметров СПС можно осуществить одним из четырех основных способов, предложенных в [4]. При этом происходит смещение зон, что используется для управления характеристиками прошедшей (отраженной) СПС волны в различных технических устройствах [1, 2, 4, 5]. Обычно величина этих изменений ограничена. Пределы изменений параметров СПС зависят от материала, из которого выполнен СПС, от допустимого уровня управляющих мощностей и т. д.

Представляет интерес рассчитать величину минимальных изменений параметров СПС, обеспечивающих непрерывное управление интенсивностью прошедшего (отраженного) СПС излучения в некотором интервале длин волн, то есть определить наименьшую величину подстройки коэффициента модуляции СПС, которая обеспечит заданный уровень прошедшей (отраженной) энергии для любой длины волны исследуемого диапазона. Предполагается, что этот диапазон значительно превышает ширину „разрешенной" или „запрещенной" зоны.

Пусть СПС представляет собой чередование двух слоев толщиной l_1 и l_2, имеющих различные свойства, и пусть ось $0x$ направлена вдоль нормали к плоскостям слоев. Тогда свойства такой СПС можно охарактеризовать функцией $f(x)=f(x+d)$,
где

$$f(x)=\begin{cases} f_1, & -l_1<x<0; \\ f_2, & 0<x<l_2, \end{cases}$$

а $d=l_1+l_2$ – период СПС.

Если из однородной среды на СПС падает волна длиной λ, то поле $u(x)$ волны в СПС описывается уравнением Хилла [1–3]:

$$\frac{d^2u}{dx^2}+k^2\left[1+\nu f(x)\right]u=0, \tag{1}$$

где ν – коэффициент модуляции СПС, k – волновое число в однородной (непериодической) среде. Для нахождения поля $u(x)$ воспользуемся подходом Флоке [1–3]:

$$u(x)=F(x)e^{i\tilde{k}x}, \qquad (2)$$

где $\tilde{k}$ – волновое число в СПС.

Пусть k_1 и k_2 – волновые числа слоев, образующих СПС. Связь между $\tilde{k}$, числами k_1 и k_2 и толщинами l_1 и l_2 определяется дисперсионным уравнением [3]:

$$\cos(\tilde{k}d)=\cos(k_1 l_1)\cos(k_2 l_2)-\frac{1}{2}\left(\frac{k_1}{k_2}+\frac{k_2}{k_1}\right)\sin(k_1 l_1)\sin(k_2 l_2), \qquad (3)$$

где

$k_1^2=k^2(1+\nu f_1)$;

$k_2^2=k^2(1+\nu f_2)$.

При $k_1 l_1=k_2 l_2=\beta$ уравнение (3) упрощается:

$$\cos(\tilde{k}d)=1-\left[1+0.5\left(\frac{k_1}{k_2}+\frac{k_2}{k_1}\right)\right]\sin^2\beta. \qquad (4)$$

Полосам пропускания соответствует $|\cos(\tilde{k}d)|\leq 1$. Когда $|\cos(\tilde{k}d)|>1$, $\tilde{k}$ – комплексно и происходит отражение падающей волны. При одновременном и одинаковом изменении величин k_1 и k_2 в правой части (4) будет изменяться только β.

Пусть наибольшей длине волны соответствует $\beta=\pi/2$. Тогда, при уменьшении длины волны, величина $|\cos(\tilde{k}d)|$ будет периодически принимать значения больше и меньше единицы. Как следует из дисперсионного уравнения (4), наибольшее смещение коэффициента модуляции, необходимое для перехода излучения заданной длины волны из состояния отражения в состояние прохождения (либо наоборот – из состояния прохождения в состояние отражения) соответствует смещению β на $\pi/2$. Абсолютная величина изменения коэффициента модуляции СПС, необходимая для изменения β на $\pi/2$, уменьшается с ростом β. То есть минимальная величина подстройки управляемого параметра СПС зависит от длины волны, интенсивностью которой надо управлять, а также от параметров СПС, входящих в произведение $k_1 l_1$ (или $k_2 l_2$).

Если воздействовать только на величину k_1 (или только на k_2), то также получим уменьшение величины смещения коэффициента модуляции с ростом величины $k_1 l_1$ (или $k_2 l_2$). При этом надо пользоваться уравнением (3), т. к. $k_1 l_1$ уже не будет равно $k_2 l_2$. Если величина смещения будет меньше чем на $\pi/2$, то возникнут нерегулируемые („мертвые") зоны.

Наибольшие смещения β будут соответствовать переходам между первыми резонансами. Пусть длина волны λ_0, соответствующая максимуму отражения, уменьшилась до λ_1, соответствующей ближайшему максимуму прозрачности. Величина β при этом изменилась от $\beta=\pi/2$ до $\beta=\pi$. Чтобы получить максимум отражения на λ_1, необходимо либо уменьшить β до $\beta=\pi/2$, либо увеличить до $\beta=3/2\pi$. Если исходный максимум отражения будет, например, $7/2\pi$, то ближайший максимум прозрачности будет $\beta=3\pi$ или $\beta=4\pi$. Величина смещения к ним будет меньше, чем смещения из $\beta=\pi$ в точки $\pi/2$ и $3/2\pi$.

При дальнейшем уменьшении длины волны β растет, а величина необходимых изменений коэффициента модуляции будет уменьшаться. Однако с ростом β растет и вклад от потерь на затухание волны в СПС. Его можно учесть, заменив в приведенных выше уравнениях волновые числа k_1 и k_2 их комплексными значениями ($k_{1,2} \to k'_{1,2} + ik''_{1,2}$). Подобные расчеты для одного и двух слоев (варикондов) были выполнены авторами в [5]. В случае $k''_{1,2} \ll k'_{1,2}$ диапазон волн, в котором осуществляется управление интенсивностью излучения, может значительно превышать расстояние между „разрешенными" и „запрещенными" зонами.

Таким образом, сверху диапазон волн ограничен условием $\beta \geq \pi/2$, а снизу величиной $k''_{1,2}$, определяющей вклад от потерь на затухание волны.

Список литературы

[1] Элаши Ш. // ТИИЭР. 1976. Т. 64. В. 12. С. 22–59.

[2] Басс Ф.Г., Булгаков А.А., Тетервов А.П. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. М.: Наука, 1989. 287 с.

[3] Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1990. 432 с.

[4] Якименко Ю.И., Кравчук С.А., Нарытник Т.Н., Селиванов С.А. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1988. Т. 31. В. 10. С. 50–56.

[5] Вербицкая Т.Н., Демехин В.В., Пономаренко В.Г. Управление коэффициентом отражения и коэффициентом прозрачности СВЧ волн. В кн.: Труды всесоюзной конференции „Реальная структура и свойства ацентричных кристаллов." Александров, 1990. 400 с.

Поступило в Редакцию
30 июня 1992 г.