

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В КОМБИНИРОВАННЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ

В. Н. Рудько

1. За последнее время появилось значительное число работ, посвященных исследованию распространения поверхностных электромагнитных волн в периодических многослойных системах [1-8]. Это обстоятельство связано в первую очередь с достижениями в разработке технологий получения таких систем (в частности, метода молекулярной эпитаксии). Хорошо известно, что поверхностная $ТН$ -волна на границе раздела двух сред с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 возможна в случае, если $\epsilon_1 + \epsilon_2 < 0$ и $\epsilon_1 \epsilon_2 < 0$ [9]. В работе [3] было показано, что поверхностные $ТЕ$ -волны могут существовать вблизи границы

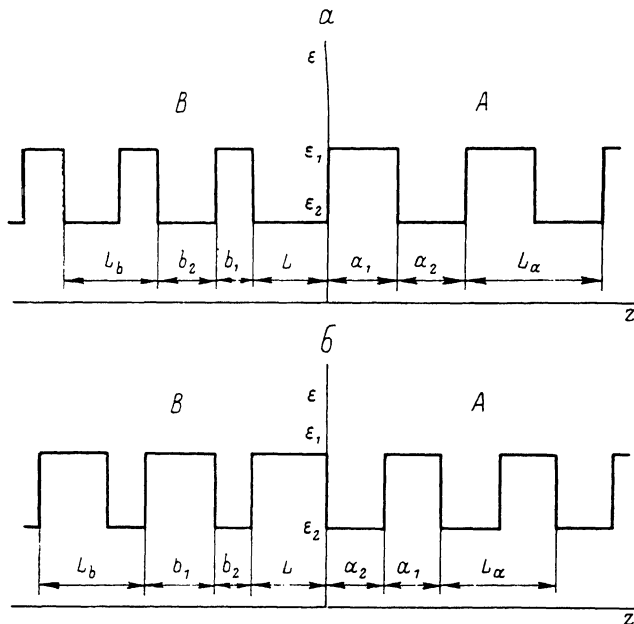


Рис. 1. Комбинированная сверхрешетка, состоящая из двух сверхрешеток А и В. Сплошная кривая — диэлектрическая проницаемость $\epsilon(z)$ и основные параметры сверхрешеток. а, б — два возможных типа комбинированных сверхрешеток (L — толщина промежуточного слоя).

раздела среды с диэлектрической проницаемостью ϵ_0 и сверхрешетки, в которой периодически чередуются слои с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 . В этом случае волна существует как результат проявления двух эффектов: полного внутреннего отражения волн, падающих на границу из глубины сверхрешетки, и брэгговского отражения волн, падающих на границу со стороны однородной среды. В этой связи возникает естественный вопрос о возможности существования поверхностных волн на границе раздела двух сверхрешеток. Близкая ситуация, когда диэлектрический слой расположен внутри сверхрешетки, была рассмотрена в работе [6]. К сожалению, допущенная в [6] при вычислениях ошибка привела к нефизичным результатам, в частности к утверждению о существовании $ТЕ$ -волн в области $k^2 > (\omega^2/c^2)\epsilon_{\max}$ (k и ω — волновой вектор и частота волны, ϵ_{\max} — наибольшая из диэлектрических проницаемостей системы), являющейся, как известно [9], недоступной для электромагнитных волн.

2. В настоящей работе мы исследуем условия существования поверхностных $ТЕ$ -волн вблизи границы раздела двух сверхрешеток. Причем будем рассматривать случай, который наиболее легко реализовать экспериментально, а именно когда каждая из сверхрешеток состоит из чередующихся слоев с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 (пусть $\epsilon_1 > \epsilon_2$), а отличие между сверхрешетками заключается в различном соотношении толщин слоев a_1/a_2 и b_1/b_2 или в различии периодов сверхрешеток L_a и L_b (рис. 1). Изготовление такой ком-

бинированной сверхрешетки с помощью эпитаксиальных или других методов практически не сложнее изготовления обычных многослойных структур [2, 10].

Выберем границу раздела решетки A с промежуточным слоем толщиной L в качестве плоскости xy , причем волна распространяется вдоль оси x , а поле E параллельно оси y . Для определенности рассмотрим случай, когда промежуточный слой имеет диэлектрическую проницаемость ϵ_2 (рис. 1, а). Ищем поле в затухающей при $z \rightarrow \pm\infty$ волне в виде [11]

$$E = E(z) e^{i(kx - \omega t)}, \quad (1)$$

где

$$E(z) = F_+ e^{-\kappa_2 z} + F_- e^{\kappa_2 z} \quad (2a)$$

при $-L < z < 0$,

$$E(z) = e^{-n\kappa_a L a} (A_+ e^{\kappa_1' (z - nL a)} + A_- e^{-\kappa_1' (z - nL a)}) \quad (2б)$$

при $nL a < z < a_1 + nL a$,

$$E(z) = e^{-n\kappa_a L a} (B_+ e^{\kappa_1' (z - a_1 - nL a)} + B_- e^{-\kappa_1' (z - a_1 - nL a)}) \quad (2в)$$

при $a_1 + nL a < z < (n+1)L a$,

$$E(z) = e^{-n\kappa_b L b} (C_+ e^{-\kappa_1' (z + L + nL b)} + C_- e^{\kappa_1' (z + L + nL b)}) \quad (2г)$$

при $-(L + b_1 + nL b) < z < -(L + nL b)$,

$$E(z) = e^{-n\kappa_b L b} (D_+ e^{-\kappa_1' (z + L + b_1 + nL b)} + D_- e^{\kappa_1' (z + L + b_1 + nL b)}) \quad (2д)$$

при $-(L + (n+1)L b) < z < -(L + b_1 + nL b)$,

$$\kappa_i = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_i}, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

A_{\pm} , B_{\pm} , C_{\pm} , D_{\pm} и F_{\pm} — неизвестные пока коэффициенты.

Граничные условия непрерывности $E_y = E$ и H_x при $z = a_1$, $z = L a$, $z = -L - b_1$ и $z = -L - L b$ дают выражения для показателей экспонент в (2) $\kappa_a L a$ и $\kappa_b L b$

$$\text{ch } \kappa_s L_s = \text{ch } \kappa_1 s_1 \text{ ch } \kappa_2 s_2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\kappa_1}{\kappa_2} + \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \right) \text{sh } \kappa_1 s_1 \text{ sh } \kappa_2 s_2, \quad (4)$$

где $s = a, b$.

Аналогичным образом из условий непрерывности при $z = 0$ и $z = -L$ получается дисперсионное уравнение для поверхностных TE -волн

$$\frac{1 - T_a}{1 + T_a} = e^{-2\kappa_1 L} \frac{1 + T_b}{1 - T_b}, \quad (5)$$

где

$$T_s = \frac{e^{-\kappa_s L_s} - \text{ch } \kappa_1 s_1 \text{ ch } \kappa_2 s_2 - \frac{\kappa_1}{\kappa_2} \text{sh } \kappa_1 s_1 \text{ sh } \kappa_2 s_2}{\text{ch } \kappa_1 s_1 \text{ sh } \kappa_2 s_2 + \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \text{sh } \kappa_1 s_1 \text{ ch } \kappa_2 s_2}, \quad (6)$$

$s = a, b$.

Из (4) и (6) легко видеть, что в области $k > \omega/c\sqrt{\epsilon_1}$ $T_s < 0$, и поэтому уравнение (5) в этой области не имеет решений.

Для комбинированной сверхрешетки (рис. 1, б) дисперсионное уравнение получается из (5) и (6) с помощью очевидной замены индексов $1 \rightleftharpoons 2$.

3. В качестве примера на рис. 2 показаны нижайшие дисперсионные кривые, полученные для ряда комбинированных сверхрешеток. Приведенные кривые соответствуют как структурам, у которых $L_a = L_b$, но $a_1/a_2 \neq b_1/b_2$, так и сверхрешеткам с $L_a \neq L_b$. Численный анализ системы уравнений (4)–(6) показывает, что в некотором выбранном интервале частот решения имеются далеко не для всех значений a_1 , a_2 , b_1 , b_2 и L . Скажем, в области $0 < k < \omega/c\sqrt{\epsilon_2}$ условия существования поверхностных TE -волн наиболее легко выполняются при $L_a/L_b \sim p/q$, где p и q — небольшие целые числа. В этом случае поверхностная волна существует как результат брэгговской дифракции волн, падающих со стороны промежуточного слоя на решетки A и B .

На рис. 3 приведена зависимость частоты волны ω от L для трех значений волнового вектора k , причем взяты такие же значения a_1 , a_2 , b_1 и b_2 , что и для кривой 2 на рис. 2. Видно, что

область существования поверхностных волн зависит от толщины промежуточного слоя L . Проводя определенную аналогию со случаем сверхрешетки, контактирующей с ϵ_2 -однородной диэлектрической средой (когда необходим промежуточный слой), можно было предполагать, что при $L=a_2$ и $L=b_2$ (т. е. когда одна сверхрешетка непосредственно переходит в другую) поверхностных волн не будет. Как следует из расчетов, существует целая область значений L вблизи точек $L=a_2$ и $L=b_2$, в которой дисперсионное уравнение (5) не имеет решений. Из рис. 3 видно, что эта область, уменьшаясь по величине, сравнительно периодически появляется с ростом L .

В области $\omega/c\sqrt{\epsilon_2} < k < \omega/c\sqrt{\epsilon_1}$ условия существования поверхностных TE -волн выполняются также в случае, когда одна из сверхрешеток (скажем, A) имеет заметно боль-

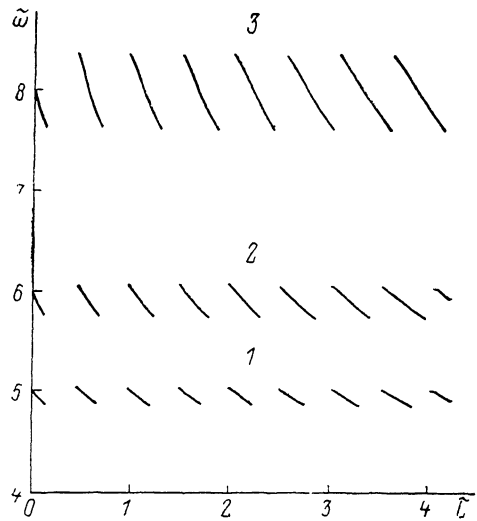
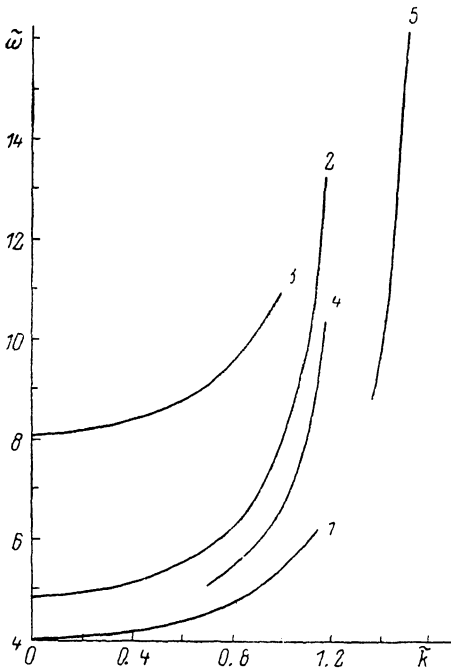


Рис. 2. Дисперсионные кривые поверхностных TE -волн для ряда комбинарованных сверхрешеток (см. рис. 1, а), представленные в безразмерных переменных: $\tilde{\omega} = \omega/cL_a$, $\tilde{k} = kc/\omega$.

$\epsilon_1=2.5$, $\epsilon_2=1.5$, 1 — $\bar{a}_1=0.9$, $\bar{a}_2=0.1$, $\bar{b}_1=0.8$, $\bar{b}_2=0.2$, $L=0.6$; 2 — $\bar{a}_1=0.1$, $\bar{a}_2=0.9$, $\bar{b}_1=0.2$, $\bar{b}_2=0.8$, $L=0.6$; 3 — $\bar{a}_1=0.85$, $\bar{a}_2=0.15$, $\bar{b}_1=1.35$, $\bar{b}_2=0.15$, $L=0.7$; 4 — $\bar{a}_1=0.5$, $\bar{a}_2=0.5$, $\bar{b}_1=0.2$, $\bar{b}_2=1.0$, $L=0.7$; 5 — $\bar{a}_1=0.9$, $\bar{a}_2=0.1$, $\bar{b}_1=0.05$, $\bar{b}_2=0.15$, $L=0.1$ (введено обозначение $\bar{l}=l/L_a$).

Рис. 3. Зависимость безразмерной частоты поверхностной TE -волны $\tilde{\omega} = \omega/cL_a$ от толщины промежуточного слоя $\tilde{L} = L/L_a$ для трех значений безразмерного волнового вектора $\tilde{k} = kc/\omega$. $\tilde{k}=0.1$ (1), 0.7 (2), 1.0 (3).

ний период, чем другая (B). Примером может служить кривая 5 на рис. 2. В этом случае решетка B выступает в известной мере в виде среды с усредненной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{эфф} \sim (\epsilon_1 b_1 + \epsilon_2 b_2)/L_b$ ($\epsilon_2 < \epsilon_{эфф} < \epsilon_1$). В целом аналогичные результаты получаются и для комбинарованной сверхрешетки, показанной на рис. 1, б.

Итак, в настоящей работе исследованы условия существования поверхностных TE -волн в комбинарованных многослойных структурах, образованных чередующимися слоями из двух веществ. Получены дисперсионные кривые привычного вида. В заключение подчеркнем, что в линейных многослойных волноводных системах невозможно существование поверхностных волн с N -образным законом дисперсии (и таких, в частности, как в работе [8]).

Литература

- [1] *Samley R. E., Mills D. L.* // Phys. Rev. B. 1984. Vol. 29. N 4. P. 1695—1706.
- [2] *Сотин В. Е., Шевцов В. М.* // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 8. С. 475—479.
- [3] *Виноградов А. В., Кожевников И. В.* // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 40. Вып. 10. С. 405—407.
- [4] *Арутюнян Г. М., Наркарарян Х. В.* // Опт. и спектр. 1984. Т. 56. Вып. 1. С. 167—169.
- [5] *Rogov E., Mashev L.* // Opt. Commun. 1985. Vol. 52. N 6. P. 393—396.
- [6] *Большинский Л. Г., Ложтев А. И.* // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 1. С. 39—43.

- [7] Булгаков А. А., Ковтун В. В. // Опт. и спектр., 1984. Т. 56. Вып. 5. С. 769—771.
 [8] Шияновский С. В. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 7. С. 1448—1450.
 [9] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
 [10] Силин А. П. // УФН. 1985. Т. 147. Вып. 3. С. 485—522.
 [11] Дэвисон С., Левин Дж. Поверхностные (таммовские) состояния. М.: Мир, 1973. 232 с.

Институт ядерных исследований
 АН УССР
 Киев

Поступило в Редакцию
 16 февраля 1988 г.

06; 07

Журнал технической физики, т. 59, в. 5, 1989

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ КРЕМНИЕВЫЙ ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПОЛЕВОЙ ФОТОТРАНЗИСТОР БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ

А. И. Малик

Кремниевые МДП фототранзисторы в области практически реализуемых в системах оптоэлектроники уровней возбуждения обладают достаточно высоким значением добротности $\sim 10^7$. Уменьшение длины канала позволяет повысить добротность прибора, однако для сохранения достаточной площади светочувствительной поверхности требуется увеличение ширины канала. Вертикальная структура полевого транзистора позволяет наиболее просто управлять размерами активной области. Структура вертикального полевого транзистора (ВПТ) со встроенной сеткой известна давно [1], они нашли широкое применение для изготовления мощных транзисторов на основе кремния. Однако использование их в качестве фотоприемников до сих пор в литературе не рассматривалось. Имеются лишь результаты исследований по применению высокоомных арсенид-галлиевых эпитаксиальных структур в конструкции ВПТ [2].

Кремниевые ВПТ изготавливались на однослойных эпитаксиальных структурах с толщиной эпитаксиального слоя 40—50 мкм и концентрацией основных носителей заряда в слое не более 10^{13} см^{-3} . Диаметр фотоактивной части структуры составлял 2 мм. Для создания областей истока в эпитаксиальный слой проводилась локальная диффузия фосфора через окна в слое диэлектрика. Поперечное сечение областей истока не превышало $4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$. Областью стока служила подложка. Прозрачный затвор выполнялся из проводящего прозрачного слоя широкозонного полупроводникового соединения In_2O_3 . Тонкая пленка данного материала осуществляла электрическое соединение затворных и истоковых областей.

При приложении к структуре внешнего смещения область канала между истоком и стоком ограничивалась областями объемного заряда под оксидом и поперечное сечение этих каналов представлялось возможным изменять как внешним смещением, так и засветкой. ВАХ структур представлены на рис. 1. Коэффициент фотоэлектрического усиления определялся по отношению к контрольным фотодиодам, имеющим такую же фотоактивную площадь и изготовленным на основе гетероструктур $\text{In}_2\text{O}_3\text{—Si}$ с использованием в качестве подложки таких же эпитаксиальных кремниевых пластин. Исследованные ВПТ обладали высоким значением коэффициента усиления в широком спектральном диапазоне 0.2—1.0 мкм. Так, на длине волны 0.95 мкм при модуляции светового потока с частотой 10 кГц, падающей мощности $2 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$ и сопротивлении нагрузки 10^2 Ом коэффициент усиления достигал величины $4 \cdot 10^3$, что соответствовало величине абсолютной монохроматической чувствительности $2 \cdot 10^3 \text{ А/Вт}$. Измеренная величина пороговой чувствительности при шумовой полосе 200 Гц составила величину порядка $7 \cdot 10^{-13} \text{ Вт/Гц}\%$. Коэффициент преобразования по току (что важно при использовании ВПТ в оптронах) составлял величину не менее 30 %, в то время как для контрольных фотодиодов данная величина была всего 0.02 %.

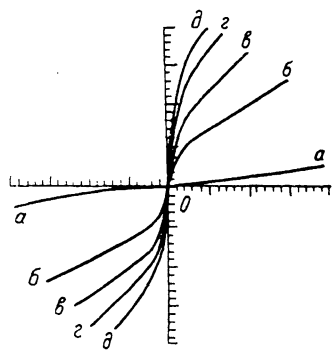


Рис. 1. ВАХ кремниевого ВПТ в темноте (а) и при освещении с $\lambda = 0.95 \text{ мкм}$ (б—в).

Р, Вт: б — $6 \cdot 10^{-5}$, в — $1.2 \cdot 10^{-4}$,
 з — $1.8 \cdot 10^{-4}$, д — $2.4 \cdot 10^{-4}$. Масштаб по горизонтали 1 В/дел, по вертикали — 1 мА/дел.