

[8] В. В. Еременко, Э. Г. Петров. В сб. „Современные проблемы оптики и ядерной физики“, „Наукова думка“, Киев, (1974).

Физико-технический институт
низких температур АН УССР,
Харьков

Поступило в Редакцию
14 апреля 1980 г.

Письма в ЖТФ, том 6, вып. 17

12 сентября 1980 г.

УСИЛЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В УСЛОВИЯХ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

В. Н. Б е л ы й, И. З. Д ж и л а в д а р и

В работе [1] исследована возможность усиления акустических волн при отражении от тонкого слоя пьезополупроводника в направлении, совпадающем с направлением сверхзвукового дрейфа электронов. Было показано, что коэффициент отражения при нормальном падении может существенно превосходить единицу. В настоящей работе показана еще одна возможность усиления ультразвука в тонком слое: при многократном полном внутреннем отражении (ПВО) от границы пьезополупроводника со сверхзвуковым дрейфом электронов. Такой способ усиления при определенных условиях позволяет получить сколь угодно высокий коэффициент усиления объемных акустических волн.

Рассмотрим наклонное падение объемной акустической волны на тонкий звукопроводящий диэлектрический слой толщины h , находящийся в акустическом контакте со звукопроводом и усиливающим пьезополупроводником, в котором параллельно границе раздела создается сверхзвуковой дрейф электронов. Предположим, что пьезоактивное направление параллельно границе раздела (см. рис. 1, где цифрами 1, 2 и 3 соответственно обозначены звукопровод, промежуточный слой и полупроводник). Сдвиговые упругие волны, поляризованные перпендикулярно плоскости падения, в каждой среде запишем в виде $u_i = u_{oi} \exp\{i(q_{ix}x + q_{iz}z) - i\omega t\}$, где q_{ix} и q_{iz} — проекции волновых векторов на оси координат, ω — частота ультразвука.

Распространение волны в полупроводнике описывается волновым вектором $\vec{q}_3(E)$, зависящим от электрического поля E , и коэффициентом электронного $\alpha_e(E)$ и решеточного α_L поглощения. Суммарный коэффициент поглощения обозначим через $\alpha = \alpha_e(E) + \alpha_L$. Акустические параметры контактирующих сред подобраны так, что $q_1 > q_2 > q_3$. Предполагается, что плоская волна падает со стороны звукопровода на границу ($z = 0$) под углом $\theta \geq \theta_1$, $[\theta_1 = \arcsin \frac{q_2}{q_1}]$,

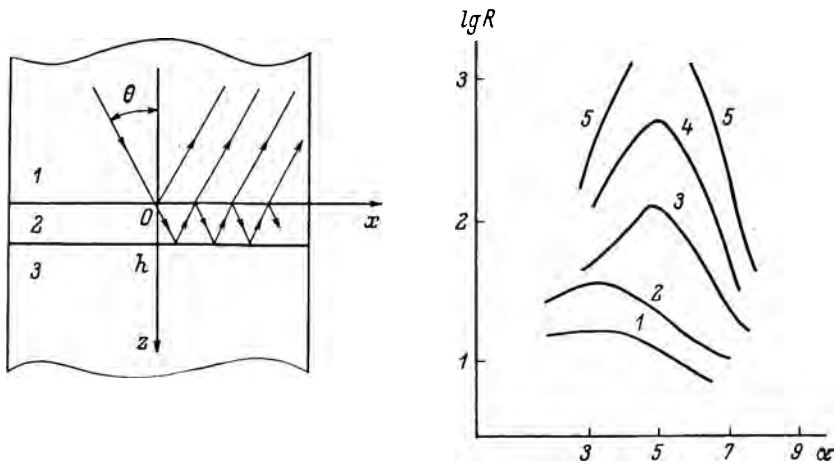


Рис. 1. Усиление УЗ-волны при многократном полном внутреннем отражении.

Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения сдвиговой волны с частотой 30 МГц от α при различной толщине промежуточного слоя. 1 - 360 мкм, 2 - 380 мкм, 3 - 410 мкм, 4 - 420 мкм, 5 - 430 мкм ($\theta = 40^{\circ}25'$).

так что на границе ($z = h$) происходит полное внутреннее отражение.

В основе данного способа усиления лежит эффект усиления ультразвука при ПВО от границы полупроводника со сверхзвуковым дрейфом носителей заряда. Аналогичный эффект в оптике - усиление света при ПВО от инверсной среды - наблюдался в работе [2] и теоретически изучен в работе [3]. Как и в оптике, можно показать, что даже при однократном отражении энергетический коэффициент отражения R_2 на границе слой-пьезополупроводник становится больше единицы при углах, больших или равных предельному θ_1 , и дается выражением

$$R_2 = \frac{(m_2 q_{2z} + q'_{3z})^2 + (q''_{3z})^2}{(m_2 q_{2z} - q'_{3z})^2 + (q''_{3z})^2} \quad (1)$$

Здесь $q'_{3z} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\delta + \sqrt{\delta^2 + 4q_3^2 \alpha^2}}$ и $q''_{3z} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{-\delta + \sqrt{\delta^2 + 4q_3^2 \alpha^2}}$ -

проекции комплексного волнового вектора преломления внутрь полупроводника упругой волны, $\delta = q_3^2 - q_1^2 \sin^2 \theta$, $q_{2z} =$

$$= \sqrt{q_2^2 - q_1^2 \sin^2 \theta}; \quad m_2 = \rho_2 v_2^2 / \rho_3 v_3^2, \text{ причем } \rho_2, \rho_3 \text{ и } v_2, v_3$$

соответственно плотности и скорости сдвиговых упругих волн слоя и полупроводника. Физическая интерпретация $R_2 > 1$ основана на том, что при полном отражении поток упругой энергии преломленной волны направлен из полупроводника к границе раздела. Из (1) следует, что максимальное значение R_2 достигается при предельном угле ПВО и равно ≈ 5.83 . Вблизи этого угла глубина проникновения ультразвуковой волны внутрь пьезополупроводника максимальна, следовательно, большее число электронов проводимости отдает энергию в отраженную волну.

Очевидно, что эффект усиления может быть значительно увеличен при многократном ПВО от границы звукопровода и пьезополупроводника. Суммируя волны в звукопроводе, испытывавшие одно, два, три и т.д. полных отражения от границы пьезополупроводника, найдем энергетический коэффициент усиления R , определяемый как отношение интенсивности отраженной к интенсивности падающей на слой волны

$$R = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(2\varphi - \Delta)}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(2\varphi - \Delta)}, \quad (2)$$

где $R_1 = (m_1 q_{1z} - q_{2z} / m_1 q_{1z} + q_{2z})^2$ - коэффициент отражения на верхней границе слоя, R_2 - введенный выше коэффициент отражения от нижней границы слоя, $\Delta = \arctg \left\{ 2m_2 q_{2z} q_{3z}'' / m_2^2 q_{2z}^2 - [(q_{3z}')^2 + (q_{3z}'')^2] \right\}$, $\varphi = q_{2z} h$ - фазовый набег, $q_{1z} = q_1 \cos \theta$, $m_1 = \rho_1 v_1^2 / \rho_2 v_2^2$.

Из выражения (2) следует, что R становится сколь угодно большим при выполнении энергетического $R_1 R_2 = 1$ и фазового $\cos(2\varphi - \Delta) = -1$ условий. Пренебрегая в выражении для R_2 величиной $q_{3z}'' (q_{2z} \gg q_{3z}'')$, получим из энергетического условия, что

$$q_1^2 - q_3^2 = \left(\frac{m_2}{m_1} \right)^2 \frac{(q_2^2 - q_3^2)^2}{q_3 |\alpha|}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что разность $q_2^2 - q_3^2$ должна быть порядка $\sqrt{q_3 |\alpha|}$, т.е. скорости сдвиговых волн в слое v_2 и полупроводнике v_3 близки: $v_2 \approx v_3$. В то же время скорости сдвиговой волны в звукопроводе v_1 и в полупроводнике v_3 связаны соотношением

$$v_3 \sin \theta = v_1, \quad v_3 - v_1 \text{ может быть большой.} \quad (4)$$

Полагая далее в фазовом условии $\Delta \approx 0$ (т.к. $q_{2z} \gg q'_{2z}, q''_{3z}$), получим условие, налагаемое на толщину промежуточного слоя

$$h = \frac{(2N-1)\pi}{4\sqrt{q_2^2 - q_3^2}}, \quad (N = 1, 2, \dots). \quad (5)$$

Заметим, что для усиления необходимо лишь приближенное выполнение соотношений (3)–(5). Чем точнее параметры системы q_1, q_2, q_3 и α удовлетворяют этим условиям, тем выше коэффициент усиления. В пределе при точном выполнении энергетического и фазового условий наступает самовозбуждение слоя. В качестве примера рассмотрим структуру, в которой активный элемент выполнен из кристалла ZnO , в качестве промежуточного слоя служит пластинка из $LiSO_3$, а звукопровод выполнен из кристалла германата висмута. На рис.2 показана зависимость R от коэффициента усиления α при различной толщине промежуточного слоя. Видно, что при определенных α и h имеется значительное усиление отраженных от слоя волн.

Особенностью данного способа является то, что отсутствуют потери, обусловленные электронным поглощением при встречном дрейфе. Взаимодействие ультразвуковой волны с дрейфовым потоком осуществляется в тонком (порядка длины волны) слое вблизи поверхности полупроводника. Это должно приводить к значительному уменьшению коэффициента шума, т.к. усиление звука при отражении происходит в узком телесном угле, вблизи предельного угла ПВО.

Л и т е р а т у р а

- [1] Г.Д. Мансфельд, Ю.В. Гуляев. Письма в ЖТФ, 5, 1473 (1979).
- [2] Б.Я. Коган, В.М. Волков, С.А. Лебедев. Письма в ЖЭТФ, 16, 144 (1972).
- [3] С.А. Лебедев, В.А. Кизель, Б.Я. Коган. Квантовая электроника, 3, 2446 (1976).
- [4] Б.Б. Бойко, Н.С. Петров, И.З. Джилавдари. В сб. „Квантовая электроника и лазерная спектроскопия“, „Наука и техника“, Минск (1974).

Институт физики АН БССР,
Минск

Поступило в Редакцию
19 мая 1980 г.
В окончательной редакции
23 июля 1980 г.