

вались ионами с энергией 30 кэВ и объемной дозой $5 \cdot 10^{19}$ см⁻³. После имплантации производился импульсный отжиг радиационных дефектов. Кривая 3 показывает плотность ЛС в имплантированном образце после отжига. На основании полученных данных можно сделать вывод, что интенсивность максимума при энергии 103.2 эВ в слоях SiN_x , близких по составу к стехиометрическому нитриду кремния, коррелирует с содержанием азота в пленке, и что азот при его относительном избытке ответственен за образование локализованных состояний в верхней части щели подвижности.

Таким образом, методом УМРС впервые определены электронная структура ВЗ и особенности спектра ЛС аморфных пленок SiN_x .

В заключение авторы выражают благодарность А.Г. Итальянцеву и В.Н. Мордковичу за проведение имплантации азота в слой $a-Si_3N$.

Л и т е р а т у р а

- [1] D u n n e t t B., L e C o m b e r P.G., S p e a r W.E. // Phil. Mag. B. 1988, V. 57. N 4. P. 483-492.
- [2] T e r e k h o v V.A., T r o s t j a n s k i j S.N., D o m a s h e v s k a y a E.P., G o l i k o v a O.A. // Phys. Stat. Sol. (B), 1986. V. 138. P. 647-653.
- [3] Б р ы т о в И.А., Г р и ц е н к о В.А., Р о м а ш е н к о Ю.Н. // ФТТ, 1984. Т. 26. № 6. С. 1685-1690.

Поступило в Редакцию
4 октября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 1

12 января 1989 г.

ВЗАИМНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ

Д.К. Г р а м о т н е в

В работе [1] было описано взаимное преобразование сдвиговых поверхностных и объемных акустических волн на периодически возмущенной поверхности твердого тела, продемонстрирован резонансный характер такого преобразования. В данной статье на примере сдвиговых волн рассматривается еще один тип взаимного резонансного преобразования поверхностных и объемных акустических волн. Такое преобразование может иметь место в слоистой структуре и аналогично эффекту нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) при возбуждении или обнаружении поверхностных [2] и волноводных [3-5] электромагнитных волн. Получены условия акустического резонанса и подавления зеркального отражения сдвиговой

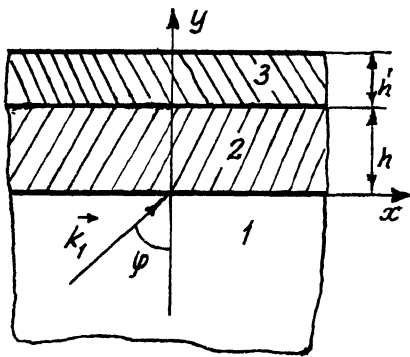


Схема слоистой структуры, обеспечивающей НПВО объемной сдвиговой волны с волновым вектором \vec{k}_1 .

объемной волны в слоистой структуре, а также определены характерные времена установления стационарного режима НПВО и стационарные значения амплитуд возбуждаемых при этом поверхностных акустических волн.

Рассмотрим систему из двух слоев на изотропном упругом полупространстве, из объема которого падает сдвиговая волна со смещениями по оси z под углом φ к оси y (см. рисунок). Если выполнено условие

$$\gamma^2 = k_1^2 \sin^2 \varphi - k_2^2 > 0, \quad (1)$$

где $k_{1,2}^2 = \omega^2 \rho_{1,2} / \mu_{1,2}$, ω - частота волны, а ρ_1, μ_1 и ρ_2, μ_2 - плотности и модули сдвига полупространства "1" и слоя "2" соответственно (см. рисунок), то волна, прошедшая в слой "2" через границу раздела $y = 0$, экспоненциально убывает по закону $\sim \exp\{-\gamma y\}$. Таким образом, если толщина этого слоя $h = +\infty$, то должно наблюдаться полное внутреннее отражение объемной волны от границы $y = 0$. При конечной величине h волна проникает и в слой "3", возбуждая в нем сдвиговые колебания. Если проекция волнового вектора падающей волны k_1 на ось x равна волновому вектору волны Лява в слое "3" - полупространстве "2", то в структуре может возникнуть акустический резонанс - резкое возрастание амплитуды поверхностной слабо утекающей волны Лява за счет тунелирования падающей волны через слой "2".

Действительно, будем искать решения уравнений движения в полупространстве и каждом из двух слоев в виде суммы прошедшей и отраженной волн аналогично тому, как это делалось для электромагнитных волн [2]. В случае достаточно толстого слоя "2" ($\gamma h \gg 1$) условие резонанса, которое математически выражается в равенстве нулю детерминанта системы уравнений, получаемой при подстановке решений в обычные граничные условия теории упругости, имеет вид:

$$\gamma g \mathcal{X}_r h' = \mu_2 \gamma_r / \mu_{3y} \mathcal{X}_r, \quad (2)$$

где $\gamma_r \equiv \gamma(\varphi_r)$, а

$$\mathcal{X}_r^2 \equiv \mathcal{X}^2(\varphi_r) = (\rho_3 \omega^2 - \mu_{3x} k_1^2 \sin^2 \varphi_r) / \mu_{3y} > 0, \quad (3)$$

слой "3" с толщиной h' и плотностью ρ_3 считаем в общем

случае анизотропным, причем плоскость (x, y) является плоскостью зеркальной симметрии слоя, а μ_{3x} и μ_{3y} — его модули сдвига, определяющие скорости поперечных объемных волн, распространяющихся вдоль осей x и y . Выражение (2) совпадает по форме с дисперсионным соотношением для волн Лява в структуре слой „3” — полупространство „2” и совместно с (1) и (3) определяет резонансное значение угла φ_r , при котором в случае малой диссипации практически вся энергия падающей волны перекачивается в энергию поверхностной волны Лява и коэффициент отражения объемной волны от слоистой структуры обращается в нуль аналогично эффекту НПВО в оптике [2–5].

Сильно анизотропный и достаточно тонкий слой „3”, когда $\mu_{3x} \ll \mu_{3y}$ и $\omega h' \sqrt{\rho_3 / \mu_{3y}} \ll 1$, можно рассматривать [6] в качестве массовой нагрузки верхней границы изотропного слоя „2”. При этом из (1)–(3) нетрудно получить выражение для резонансного угла φ_r в явном виде:

$$\varphi_r = \arcsin \left(\frac{m^2 \omega^2 \mu_1 + \mu_1 \mu_2 \rho_2}{\mu_2^2 \rho_1} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где $m = \rho_3 h'$ — поверхностная плотность массовой нагрузки верхней границы слоя „2”. В стационарном случае для конечной, но большой толщины этого слоя ($\gamma_r h \gg 1$) амплитуда поверхностной волны экспоненциально растет при $h \rightarrow +\infty$:

$$u_s(t \rightarrow +\infty) = \frac{\mu_1 k_1 \cos \varphi_r}{\mu_1 k_1 \cos \varphi_r - i m \omega^2} u_0 \exp \{ \gamma_r h \}, \quad (5)$$

где u_0 — амплитуда смещений в падающей волне. С помощью перенормировки констант в решении, аналогичной той, которая использовалась в [7] для нахождения зависимости от времени амплитуды вынужденных колебаний маятника при резонансе, получаем линейную по времени зависимость

$$u_s(t) = \frac{2 \omega \mu_1 k_1 \cos \varphi_r}{m \omega^2 - i \mu_1 k_1 \cos \varphi_r} u_0 t \exp \{ -\gamma_r h \}, \quad (6)$$

справедливую при $u_s(t) \ll u_s(+\infty)$. Характерное время установления стационарного режима можно получить из выражений (5) и (6):

$$\tau \approx \exp \{ 2 \gamma_r h \} / 2 \omega. \quad (7)$$

В общем случае для волн Лява, когда неприменимо приближение массовой нагрузки, время установления стационарного режима равно:

$$\tau \approx \mu_2 \gamma_r h' \exp \{ 2 \gamma_r h \} / (\mu_{3y} \omega \sin \alpha_r h' \sin 2 \alpha_r h'). \quad (8)$$

Полученные выражения для τ (7), (8) определяют характерное время, по истечению которого от момента включения падающего излучения амплитуды поверхностных волн практически перестают расти, а отраженная волна (при малой диссипации) обращается в нуль. При выключении падающей волны слабо утекающая волна Лява затухает со временем по экспоненциальному закону за счет переизлучения в объемную волну.

Аналогично можно показать, что НПВО может иметь место также при возбуждении других типов поверхностных волн, например, рэлеевских, волн Гуляева-Блюштейна и т.д. При этом проекция волнового вектора падающей волны (поперечной или продольной) на ось x должна равняться волновому вектору соответствующей поверхностной акустической волны. Длины возбуждаемых или регистрируемых таким способом поверхностных волн не ограничиваются технологическими возможностями создания различных традиционных резонансных преобразовательных структур (например, решеток [1]) и могут быть порядка длин низкотемпературных ($T \ll \theta$ - температуры Дебая) акустических фононов. При возбуждении поверхностных акустических волн по методу НПВО не требуется выполнение довольно жестких условий, которые необходимы для эффективной генерации этих волн с помощью клина [8]. Кроме того, генерация различных типов поверхностных волн по методу НПВО осуществляется (в отличие от метода клина) непосредственно на свободной поверхности образца, на которой при этом могут быть различные структуры или слои. Все это позволяет использовать НПВО при изучении поверхностных акустических фононов, дефектности границ раздела, капиллярных [9, 10] и других поверхностных эффектов в твердых телах, при создании устройств обработки сигналов на поверхностных акустических волнах (например, фильтров и спектрометров), работающих в высокочастотных диапазонах, а также для контроля параметров слоистых структур, в том числе и в процессе их изготовления.

Автор выражает благодарность Л.А. Чернозатонскому и М.П. Бахтуруину за обсуждение результатов и ценные замечания.

Л и т е р а т у р а

- [1] Гуляев Ю.В., Курач Т.Н., Плесский В.П. // Письма в ЖЭТФ, 1979. Т. 29. № 9. С. 563-566.
- [2] Поверхностные поляритоны. / Под ред. Аграновича В.М., Миллса Л.Л. М.: Наука, 1985. 526 с.
- [3] Иогансен Л.В. // ЖЭТФ, 1961. Т. 40, № 6, С. 1838-1843.
- [4] Иогансен Л.В. // ЖТФ. 1962. Т. 32. № 4. С. 406-418.
- [5] I o g a n s e n L.V. // JOSA, 1976, v. 66, N 9, P. 972-974.
- [6] Косевич Ю.А., Сыркин Е.С. // Акуст. ж. 1988. Т. 34, № 1. С. 113-116.

- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1973. 208 с.
- [8] Vertoni H.L. // IEEE Trans. 1975, V.SU-22. N 6. P. 421-430.
- [9] Красильников В.А., Крылов В.В. // Акуст. ж. 1980. Т. 26. № 5. С. 732-734.
- [10] Андреев А.Ф., Косевич Ю.А. // ЖЭТФ, 1981. Т. 81. № 4(10), С. 1435-1443.

Поступило в Редакцию
26 октября 1988 г.