

УДК 539.3/6

ПРЕДЕЛЬНЫЕ АМПЛИТУДЫ СИЛЬНЫХ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ТОНКИХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНКАХ
АРАКЕЛЯН М.М., ПЕТРОСЯН А.М.

*Армянский государственный педагогический университет им. Х.Абовяна,
010, Ереван, пр. Тигран Меци 17
e-mail.marakelyan@ysu.am*

В сильных звуковых полях в квантованных полупроводниковых пленках найдены дополнительные по сравнению с массивным образцом ограничения на величину предельных значений амплитуд внешних воздействий, зависящие от параметров пленки и упругого поля.

Ключевые слова: упругие волны, тонкие пленки, напряжения, деформации, прочность.

Поступило в редакцию 12.10.2016г.

Прочность – свойство материала, характеризующее его способность сопротивляться необратимому деформированию под действием внешней нагрузки. Предел прочности – напряжение или деформация, соответствующие максимальному (в момент разрушения материала) значению нагрузки. Предел прочности – основная характеристика механических свойств материалов, которые разрушаются при малых пластических деформациях.

Наиболее широко применяемыми полупроводниками являются германий и кремний. Германий используется для изготовления выпрямителей, транзисторов, фотодиодов, линз для инфракрасных лучей и т.д. Нелегированный кремний применяют при создании мощных силовых выпрямителей, стабилизаторов напряжений, солнечных батарей, структур, состоящих из чередующихся полупроводниковых слоев и других приборов.

В полупроводниковых приборах, работающих при повышенных токовых и тепловых нагрузках, в материале возбуждается звук, взаимодействующий с упругой средой. Возбуждающиеся сильные звуковые волны оказывают влияние на прочность полупроводниковых пластин. Под действием сильных звуковых волн в тонких полупроводниковых пленках могут возникать напряжения и деформации, превышающие допустимые пределы для данного материала и толщины пленки.

В последнее время в связи с миниатюризацией классических микроэлектронных приборов возрос интерес к пленочным системам. Поэтому при создании новых полупроводниковых приборов актуальным является расчет тонких пленок на прочность при взаимодействии с сильными звуковыми волнами.

Под действием сильных звуковых волн в тонких полупроводниковых пленках могут возникать напряжения и деформации, превышающие допустимые пределы для данного материала и толщины пленки.

Характер колебаний в пленке существенно отличается от колебаний в массивных образцах. Имеется тонкая полупроводниковая пленка толщиной $2l$, ось Z направлена

перпендикулярно плоскости пленки. Истинный вектор деформации в упругой волне в этом случае является суммой поперечной и продольной составляющей волн, компоненты каждой из составляющих удовлетворяют волновым уравнениям с соответствующими значениями скоростей. (В случае объемных волн в неограниченной среде эти две составляющие представляют собой независимо распространяющиеся волны). Рассмотрим продольные и поперечные волны, смещения \vec{u} в которых лежат в вертикальной плоскости, проходящей через волновой вектор. Проводимый расчет ограничен областью температур $T < \theta/n$, где θ – температура Дебая, n – число атомных слоев в пленке [1].

Для рассматриваемых типов волн удобно ввести потенциалы Φ и A_y , при помощи которых вектор \vec{u} может быть представлен в виде (из векторного анализа известно, что такое представление всегда возможно):

$$\vec{u} = \nabla\Phi + \text{rot}A_y. \quad (1.1)$$

Потенциалы Φ и A_y удовлетворяют волновым уравнениям. Решения этих уравнений при незакрепленных границах в случае продольных волн (симметричные колебания) могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} \Phi &= Ach(\alpha z) \exp i(qx - \omega t) \\ A_y &= B \sin(\beta z) \exp i(qx - \omega t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

где

$$\alpha^2 = q^2 - \frac{\omega^2}{c_\tau^2}, \quad \beta^2 = \frac{\omega^2}{c_\tau^2} - q^2$$

В случае деформации сдвига (антисимметричные колебания) решение имеет вид:

$$\begin{aligned} \Phi &= Ash(\alpha z) \exp i(qx - \omega t) \\ A_y &= Bch(\beta z) \exp i(qx - \omega t) \end{aligned} \quad (1.3)$$

где

$$\beta^2 = q^2 - \frac{\omega^2}{c_\tau^2}; \quad \alpha^2 = q^2 - \frac{\omega^2}{c_\tau^2}.$$

С учетом зависимостей (1.2) и (1.3) полный вектор смещения может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned} \vec{u} = \vec{u}_{np} + \vec{u}_{usz} &= \exp i(qx - \omega t) \left\{ \vec{i} \left[Aiqe^{\alpha z} - B\beta \left(\cos \beta z + \frac{e^{\beta z}}{2} + \frac{e^{-\beta z}}{2} \right) \right] + \right. \\ &\left. + \vec{k} \left[A\alpha e^{\alpha z} + Biq \left(\sin \beta z + \frac{e^{\beta z}}{2} + \frac{e^{-\beta z}}{2} \right) \right] \right\}; \end{aligned} \quad (1.4)$$

Компоненты смещения имеют вид:

$$\begin{aligned} u_x &= \exp i(qx - \omega t) \left[Aiqe^{\alpha z} - B\beta \left(\cos \beta z + \frac{e^{\beta z}}{2} + \frac{e^{-\beta z}}{2} \right) \right]; \\ u_z &= \exp i(qx - \omega t) \left[A\alpha e^{\alpha z} + Biq \left(\sin \beta z + \frac{e^{\beta z}}{2} + \frac{e^{-\beta z}}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Перейдем к определению компонент деформаций и напряжений, при этом берем их реальную часть. Пользуясь известными соотношениями теории упругости [2], напряженно-деформированное состояние пленки можно описать следующим образом:

линейные деформации

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_y = 0 \quad , \quad (1.6)$$

сдвиговые деформации

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}; \quad \gamma_{xy} = 0; \quad \gamma_{yz} = 0.$$

Так как компоненты смещений u_x и u_z не зависят от координаты y , напряжения и деформации в рассматриваемом случае связаны следующим образом:

нормальные напряжения

$$\sigma_x = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_x; \quad \sigma_y = \lambda\theta; \quad \sigma_z = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_z \quad (1.7)$$

касательные напряжения

$$\tau_{xz} = \mu\gamma_{xz}; \quad \tau_{yz} = 0; \quad \tau_{xy} = 0,$$

где $\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_z$ –объемная деформация.

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

где ν -коэффициент Пуассона, E -модуль продольной упругости материала, λ и μ – коэффициенты Ламе.

Подставляя в формулы (1.6) и (1.7) реальные части смещений u_x и u_z найдем значение деформаций и напряжений, которые зависят от амплитуд продольных и изгибных волн.

Поскольку пленка имеет определенную прочность, то налагается ограничение на величины компонент напряжений, тем самым ограничиваются амплитуды внешнего воздействия. Для отыскания предельных значений амплитуд воспользуемся условием прочности в виде [2]:

$$(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau^2 = \sigma_T^2 \quad (1.8)$$

где σ_T –напряжение предельного состояния материала.

Из условия прочности (1.8) с учетом зависимостей (1.5), (1.6), (1.7) при граничных условиях $z = l; \sigma_z = 0; \tau_{xz} = 0$ получаем следующее выражение для отыскания предельных амплитуд:

$$2qB\beta \left(\cos \beta l + \frac{e^{\beta l}}{2} - \frac{e^{-\beta l}}{2} \right) \sin(qx - \omega t) - A(q^2 + \alpha^2)e^{\alpha l} \cos(qx - \omega t) = \frac{\sigma_T}{2\mu}. \quad (1.9)$$

Задавая фазу волны для двух случаев $qx - \omega t = \frac{\pi}{2}$ и $qx - \omega t = \pi$, получаем допустимые значения коэффициентов A и B при данной толщине пленки и прочностных характеристиках материала:

$$A = \frac{\sigma_T}{2\mu(q^2 + \alpha^2)e^{\alpha l}}; \quad B = \frac{\sigma_T}{4\mu\beta q \left(\cos \beta l + \frac{e^{\beta l}}{2} - \frac{e^{-\beta l}}{2} \right)}; \quad (1.10)$$

Таким образом, предельные амплитуды обратно пропорциональны толщине пленки, предельная амплитуда B осциллирует в зависимости от толщины, A и B обратно

пропорциональны модулю продольной упругости, который, в конечном счете, определяет величину напряжения при заданной деформации и естественно, что если для данного материала при данной деформации возникают меньшие напряжения, то предел подаваемой амплитуды растет. Кроме того, предельное значение амплитуды прямо пропорционально напряжению предельного состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тавгер Б.А., Демиховский В.Л. Взаимодействие электронов с фононами в тонких полупроводниковых пленках при низких температурах . Радиотехника и электроника 1967, 12, N9, 1631-1635.
2. Hosford W.F., Caddell R.M. Metal Forming. Mechanics and metallurgy. USA. Cambridge. 2007, 330 p.

SUMMARY

LIMITING AMPLITUDES OF THE STRONG SOUND WAVES IN THIN SEMICONDUCTOR FILMS *ARAKELYAN M.M., PETROSYAN A.M.*

The restrictions for limiting values of amplitudes of external field , additional in comparison with massive sample and depending on parameters of a film are found in the strong sound fields in quantized semiconductor films.

ԱՍՓՈՓՈՒՄ

ՉԱՅՆԱՅԻՆ ՈՒՇԵՂ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՍԱՀՄԱՆԱՅԻՆ ԱՍՊԼԻՏՈՒԴՆԵՐԸ ԲԱՐԱԿ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐՈՒՄ *ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ Մ. Մ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Հ.Մ.*

Բարակ քվանտացված կիսահաղորդչային թաղանթներում ձայնային ուժեղ ալիքների միջակայքում հայտնաբերվել են սահմանափակումներ, կապված արտաքին ազդեցությունների սահմանային ամպլիտուդների մեծությունների հետ, որոնք կախված են թաղանթի և առաձգական դաշտի պարամետրերի հետ: