

УДК 548:53+534.22

## ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ ALN/AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ALN/SI

<sup>1</sup>Двоешерстов М.Ю., <sup>2</sup>Чередник В.И., <sup>3</sup>Беляев А.В., <sup>3</sup>Денисова А.В.

<sup>1</sup>ОАО «АКБЭЛ»;

<sup>2</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород;

<sup>3</sup>ОАО КБ «Икар», e-mail: kinski2002@mail.ru

В работе показаны результаты численных расчетов и экспериментальных измерений параметров поверхностных акустических волн, распространяющихся в гетероэпитаксиальных тонкопленочных пьезоструктурах ALN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ALN/Si, предназначенных для создания на их основе СВЧ акустоэлектронных устройств. Рассчитаны и измерены скорость волны и коэффициент электромеханической связи в зависимости от относительной толщины пленки ALN, выращенной на подложках кремния Si(111) и C-ориентированного сапфира Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Ключевые слова:** поверхностные акустические волны, нитрид алюминия, кремний, сапфир, высокочастотные устройства на ПАВ

## SAW PARAMETERS EXTENDING IN THE GETEROEPITAKSIAL STRUCTURES ALN/AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ALN/SI

<sup>1</sup>Dvoesherstov M.Y., <sup>2</sup>Cherednick V.I., <sup>3</sup>Beljaev A.V., <sup>3</sup>Denisova A.V.

<sup>1</sup>Public Corporation Scietific production association «Akbel»;

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod N.I. Lobachevsky State university, <sup>3</sup>Nizhny Novgorod;

<sup>3</sup>ОАО КБ «Икар», e-mail: kinski2002@mail.ru

In this paper are shown results of numerical calculations and experimental measurements of parameters of the surface acoustic waves (SAW) extending in geteroepitaksial thin-film piezostructures of ALN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ALN/Si for creation on their basis HF SAW devices. The wave velocity and the electromechanical coupling coefficient versus the frequency-thickness product of a single layer of ALN deposited on Si(111) or C-oriented Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sapphire substrates are calculated and measured.

**Keywords:** surface acoustic waves, aluminum nitride, silicon, sapphire, HF SAW devices

Как известно [1], акустоэлектронные устройства (фильтры, резонаторы, линии задержки и т.д.) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в качестве рабочего акустопровода используют пьезокристаллические подложки кварца, ниобата лития, танталата лития и т.д. При этом для возбуждения и приема ПАВ применяется встречно-штыревой преобразователь (ВШП), представляющий из себя систему вложенных друг в друга металлических электродов. Распространение другого типа ПАВ (волны Стоунли) возможно также в многослойной структуре типа: пьезоэлектрическая пленка (например, пленка нитрида алюминия ALN)/не пьезоэлектрическая подложка (сапфир Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, кремний Si). Кроме этого [2], в отдельной тонкопленочной (толщина пленки  $h$  меньше длины  $\lambda$  электроакустической волны) пьезокристаллической структуре ALN возможно распространение объемных акустических волн различного типа. При этом возбуждение таких волн возможно как при помощи сплошных электродов, нанесенных на верхнюю и нижнюю поверхность пьезопленки, так и с помощью традиционных встречно-штыревых преоб-

разователей, используемых при возбуждении ПАВ. На этом принципе в настоящее время разрабатываются всевозможные СВЧ акустоэлектронные приборы, основой которых является акустоэлектронный СВЧ резонатор на объемных волнах (FBAR- film bulk acoustic resonator [2]). Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование свойств электроакустических волн, распространяющихся в тонкопленочных гетероэпитаксиальных структурах нитрида алюминия (ALN), выращенных на подложках из сапфира (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и кремния (Si) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

В работе приведены результаты расчета параметров электроакустических волн, распространяющихся в следующих структурах: пленка (0002) ALN, пленка (0002) ALN на подложке из сапфира Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Z-среза, пленка (0002)ALN на подложке из кремния Si ориентации (111). Во второй части работы приведены результаты экспериментальных измерений параметров акустоэлектронной линии задержки (ЛЗ) на ПАВ, сформированной на структуре (0002)ALN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Z-среза.

**Расчет параметров электроакустических волн, распространяющихся в структурах (0002)AlN, (0002)AlN/Z-срез Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и (0002)AlN/(111)Si**

Как известно, монокристалл нитрида алюминия AlN относится к гексагональному типу симметрии класса 6mm и имеет пьезоэлектрические свойства. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии [3] были выращены ориентированные монокристаллические тонкопленочные гетероэпитаксиальные структуры (0002) AlN на подложках из сапфира (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) тригональной симметрии класса 3m и кремния (Si) кубической симметрии класса 3m3, на которых возможно создание акустоэлектронных устройств различного типа, в том числе и FBAR-систем. Для изучения свойств электроакустических волн, распространяющихся в таких структурах, необходимо воспользоваться волновыми уравнениями пьезоакустики [1], из которых можно рассчитать основные параметры (скорость, коэффициент электромеханической связи, температурный коэффициент задержки, угол потока энергии и т.д.) электроакустических волн, распространяющихся в данных структурах. В акустоэлектрони-

ке [1] срез пьезокристалла и направление распространения акустической волны обычно описывают углами Эйлера ( $\phi, \theta, \psi$ ), первые два ( $\phi, \theta$ ) из которых описывают срез кристалла, а третий угол ( $\psi$ ) – направление распространения волны. В кристаллографии ориентация среза монокристалла описывается индексами Миллера ( $h, k, l$ ). В гексагональной системе плоскости часто характеризуют четырьмя индексами ( $h, k, i, l$ ), где  $h, k, l$  – независимые индексы, а  $i = -(h + k)$ . Это связано с тем, что во всех сингониях элементарную ячейку выбирают в виде параллелепипеда, а в гексагональной – в виде гексагональной прямоугольной призмы [4]. Например, Z-срез гексагонального кристалла в индексах Миллера описывается как (0002), а в углах Эйлера ( $0^\circ, 0^\circ, \psi$ ).

На рис. 1 показана рассчитанная по методике Фарнелла-Джонса [1] зависимость фазовой скорости ( $V$ ) поверхностной акустической волны в кристаллической подложке из сапфира Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Z-среза ориентации ( $0^\circ, 0^\circ, \psi = 0-180^\circ$ ) от 3-го угла Эйлера, которая была использована в качестве образующей для гетероэпитаксиального роста на ней ориентированной пленки нитрида алюминия AlN.

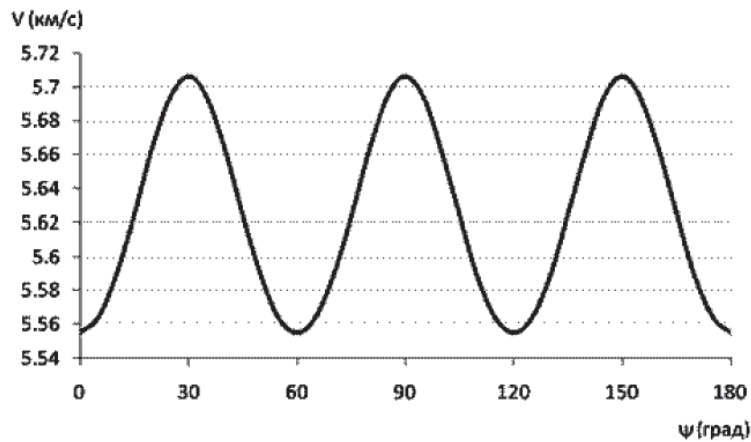


Рис. 1. Зависимость скорости ПАВ в сапфире Z-среза от 3-го угла Эйлера  $\psi$

На рис. 2 показана рассчитанная зависимость фазовой скорости ПАВ на открытой ( $V_0$ ) и закороченной ( $V_s$ ) поверхности и коэффициента электромеханической связи ( $K^2$ ) в пьезокристалле нитрида алюминия AlN Z-среза ориентации ( $0^\circ, 0^\circ, \psi = 0-180^\circ$ ) от 3-го угла Эйлера. Как видно из рис. 1, скорость ПАВ в сапфире Z-среза (тригональная 3m симметрия) имеет различные значения в зависимости от направления распространения в Z-срезе (от 5555,3 до 5706,3 м/с),

а скорость ПАВ в пьезокристаллическом нитриде алюминия Z-среза (гексагональная 6mm симметрия) постоянна, т.е. не зависит от направления распространения и имеет значения:  $V_0 = 5402,2$  м/с,  $V_s = 5394,6$  м/с. Коэффициент электромеханической связи  $K^2$ , характеризующий пьезосвойства материала AlN, имеет величину 0,28%. При этом фазовая скорость ПАВ в сапфире выше, чем фазовая скорость ПАВ в нитриде алюминия.

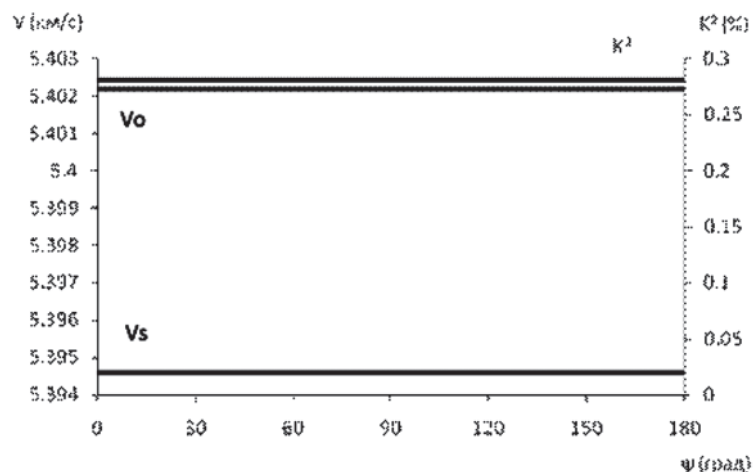


Рис. 2. Зависимость скорости ПАВ и коэффициента электромеханической связи  $K^2$  в нитриде алюминия Z-среза от 3-го угла Эйлера  $\psi$

На рис. 3 показаны рассчитанные зависимости скорости  $V_0$  ПАВ и  $K^2$  от относительной толщины  $h/\lambda$  ( $h$  – толщина,  $\lambda$  – длина акустической волны) пленки AlN на полубесконечной подложке ZX-среза  $Al_2O_3$ . Видно, что скорость ПАВ имеет дисперсию – зависит от толщины пленки. При малых толщинах пленки энергия ПАВ сосре-

доточена в основном в сапфире и поэтому результирующая скорость волны определяется скоростью распространения в материале подложки из сапфира. С ростом толщины пленки скорость ПАВ уменьшается и стремится к скорости ПАВ в материале AlN. При  $h/\lambda > 1$  практически вся энергия ПАВ сосредоточена в материале пленки AlN.

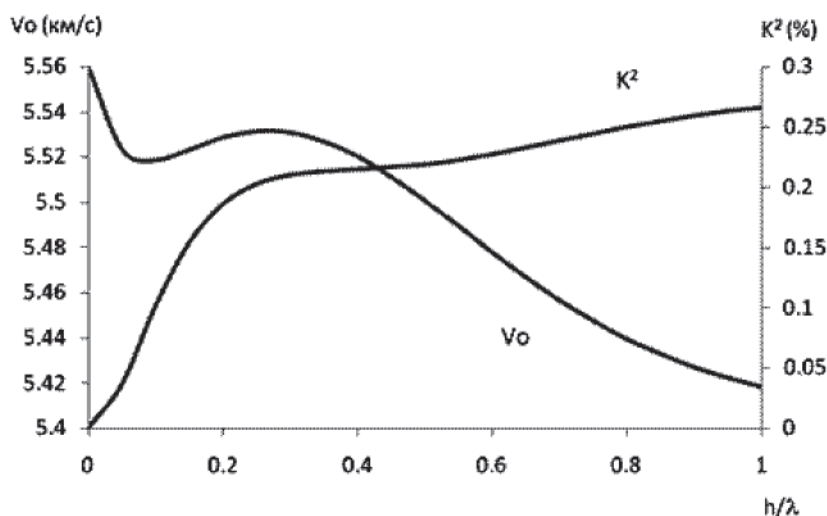


Рис. 3. Зависимость  $V_0$  и  $K^2$  от  $h/\lambda$  в структуре (0002)AlN/ZX- $Al_2O_3$

На рис. 4 показана рассчитанная зависимость скорости ПАВ в кристаллической подложке из кремния (111) Si ориентации ( $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\psi = 0-180^\circ$ ) от 3-го угла Эйлера, которая может быть использована в качестве образующей для гетероэпитаксиального роста пленки AlN. Из рис. 4 видно, что фазовая скорость ПАВ в (111) Si имеет различные значения в зависимости от направления распространения ( $V$ ) и лежит в пределах от 4481,7 до 5032,1 м/с. На рис. 5

показаны рассчитанные зависимости скорости  $V_0$  и  $K^2$  ПАВ от относительной толщины  $h/\lambda$  пленки в структуре (0002)AlN/( $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $90^\circ$ ) Si. При малых толщинах пленки энергия ПАВ сосредоточена в основном в материале подложки из кремния и поэтому результирующая скорость ПАВ определяется скоростью волны в кремнии. С ростом толщины пленки энергия волны сосредоточивается постепенно в пленке AlN и скорость ПАВ стремится к скорости ПАВ в материале

ле AlN. При  $h/\lambda > 1$  вся энергия ПАВ волны сосредоточена в материале пленки AlN. Необходимо отметить, что максимальное зна-

чение коэффициента электромеханической связи  $K^2 = 0,45\%$  в такой структуре при  $h/\lambda = 0,5$ .

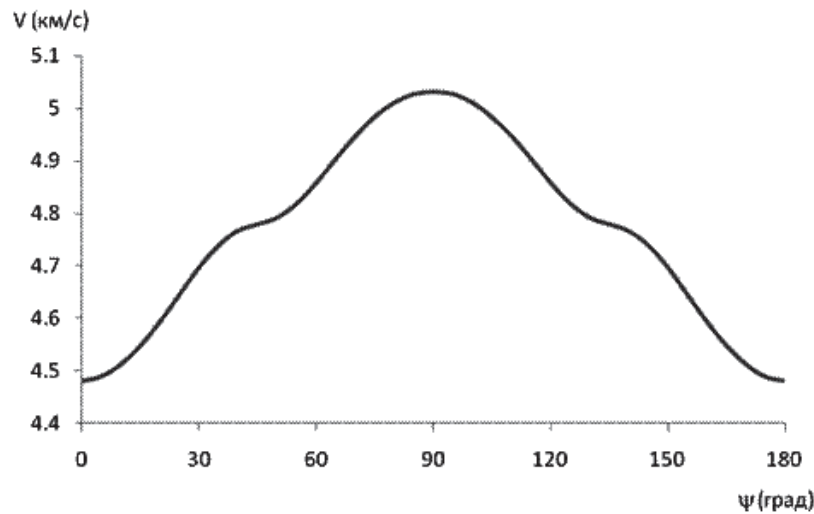


Рис. 4. Зависимость скорости ПАВ в кремнии от 3-го угла Эйлера

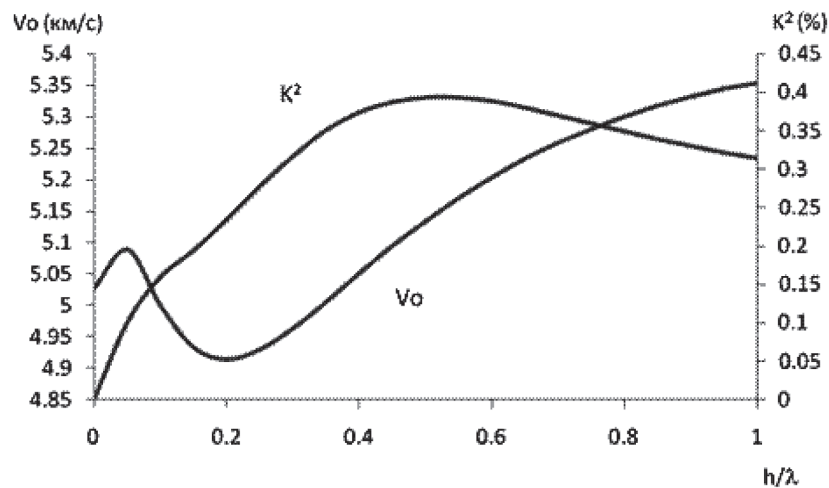


Рис. 5. Зависимость  $V_0$  и  $K^2$  от  $h/\lambda$  в структуре  $(0002)AlN/(111)Si$

**Линия задержки на ПАВ на структуре  $(0002)AlN/Z$ -срез  $Al_2O_3$ .**

*Эксперимент*

Методом МЛЭ были выращены тонкопленочные гетероструктуры  $(0002)AlN$  толщиной 2 мкм на сапфировой подложке Z-среза толщиной 0,5 мм. Были изготовлены две линии задержки на ПАВ. Структурная схема ЛЗ показана на рис. 6.

В случае реализации ЛЗ на частоту 230 МГц встречно-штыревой преобразователь ВШП был ориентирован в направлении X (ориентация  $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ , ZX-срез) со следующими параметрами: апертура алюминиевых электродов  $W = 1$  мм, число пар электродов ВШП – 50, коэффициент

металлизации электродов – 0,5, толщина электродов – 0,2 мкм, расстояние между ВШП – 9,7 мм, пространственный период электродов  $P = \lambda/2 = 12$  мкм, относительная толщина пленки AlN  $h/\lambda \approx 0,08$ .

Измеренная амплитудно-частотная характеристика согласованной линии задержки (центральная частота 230,2 МГц, полоса 3 МГц, внеполосное затухание 30 дБ) показана на рис. 7. Измеренная задержка импульса  $t = 1,76$  мкс на расстоянии 9,7 мм между ВШП. При этом рассчитанная по результатам эксперимента скорость волны составила  $V \approx 5511$  м/с, что хорошо согласуется с теоретически рассчитанными данными (см. рис. 3).

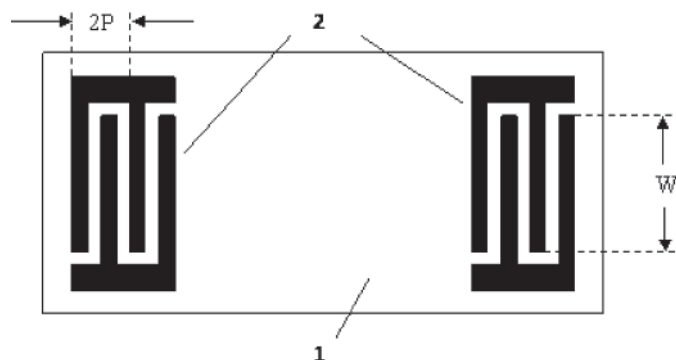


Рис. 6. Линия задержки на ПАВ:  
1 – подложка (0002)AlN на подложке из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Z-срез);  
2 – встречно-штыревые преобразователи (ВШП) с периодом  $P = \lambda/2$

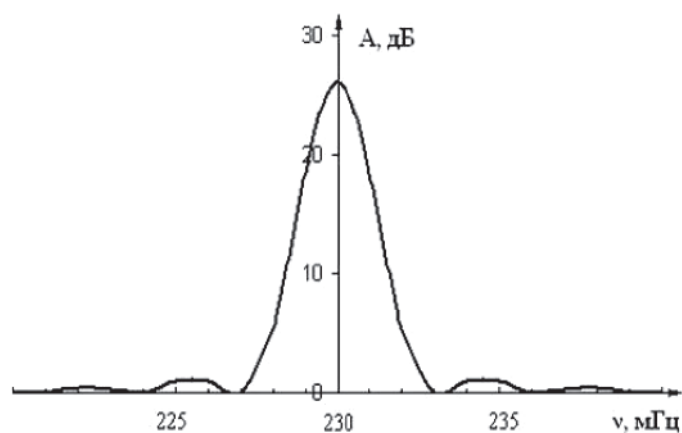


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика ЛЗ на ПАВ

В случае реализации ЛЗ на ПАВ на частоту 477 МГц ВШП был ориентирован в направлении  $Y$  (ориентация  $(0^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$ , ZY-срез). При этом период электродов ВШП  $P = 6,25$  мкм, а относительная толщина пленки, соответствующая данной частоте,  $h/\lambda \approx 0,16$ . На рис. 8 показаны теоретически

рассчитанные зависимости скорости и  $K^2$  ПАВ от относительной толщины пленки  $h/\lambda$  и результаты экспериментальных измерений для структуры (0002)AlN /ZY-срез Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (углы Эйлера  $(0^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$ ). Из рис. 8 видно, что результаты экспериментальных измерений хорошо согласуются с результатами теории.

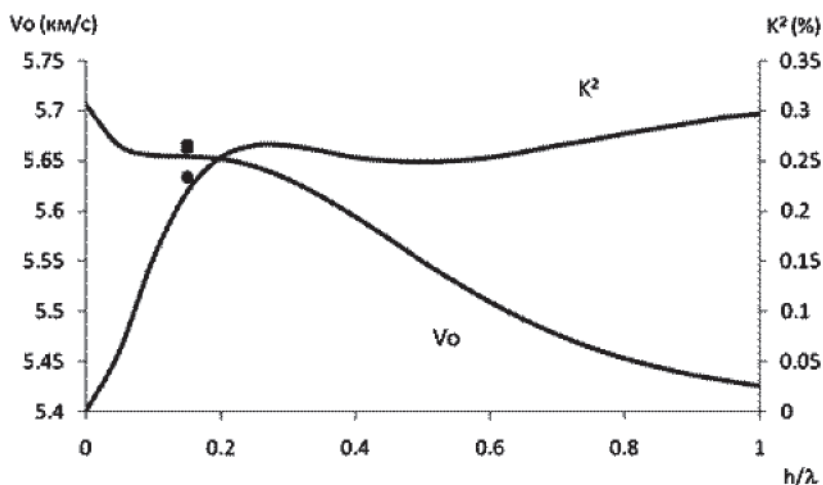


Рис. 8. Зависимости  $V_0$  и  $K^2$  ПАВ от  $h/\lambda$  в структуре (0002)AlN/ZY-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### Заключение

Таким образом, результаты теоретических расчетов и экспериментальных измерений параметров ПАВ, распространяющихся в гетероэпитаксиальных структурах AlN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, практически совпадают. Результаты эксперимента подтверждают, следовательно, что выращенная методом МЛЭ пленка нитрида алюминия на сапфировой подложке имеет пьезокристаллические свойства. При этом в зависимости от направления распространения акустической волны (ZX-срез, ZY-срез) скорость и коэффициент электромеханической связи ПАВ в такой структуре имеют различные значения. Выращенная гетероэпитаксиальная структура (0002)AlN/Z-срез Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> может

быть использована при конструировании акустоэлектронных устройств различного типа (линия задержки, фильтр, резонатор и т.д.), а также для построения на ее основе СВЧ акустоэлектронных резонаторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мэтьюз Г. Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология и применение. – М.: Радио и связь, 1981. – 472 с.
2. Lakin M. Thin film resonator technology // IEEE Trans. on ultrason., ferroelectr., and frequency control. – 2005. – Vol. 52, №5. – P. 707–715
3. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры: пер. с англ.; под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева. – М.: Изд-во «Мир», 1989. – С. 589.
4. Шаскольская М.П. Акустические кристаллы. – М.: Наука, 1982. – 632 с.