

С.И. Босов<sup>1</sup>, М.Ю. Двоешерстов<sup>2</sup>, Н.В. Леонтьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>ОАО «Конструкторское Бюро «Икар»

## МКЭ моделирование СВЧ тонкопленочных многослойных акустоэлектронных резонаторов на объемных акустических волнах

*В работе изложена методика численного МКЭ моделирования СВЧ тонкопленочных акустоэлектронных резонаторов на объемных акустических волнах. Проведено сравнение результатов численного расчета с результатами, полученными с помощью одномерной теории Новотного-Бенеша.*

**Ключевые слова:** акустоэлектроника, СВЧ резонатор, объемные акустические волны, МКЭ, моделирование

Новые технологии гетероэпитаксиального выращивания тонкопленочных пьезоструктур уже сейчас позволяют создавать СВЧ акустоэлектронные компоненты, работающие в диапазоне рабочих частот от 1 до 30 ГГц. К таким компонентам, прежде всего, относятся акустоэлектронные резонаторы на основе ориентированных тонкопленочных гетероэпитаксиальных структур из нитрида алюминия (001)AlN, выращенных на подложках из кремния Si (FBAR, film bulk acoustic resonator) [1]. На рис. 1 приведена конструкция одночастотного FBAR резонатора на продольных акустических волнах мембранного типа.

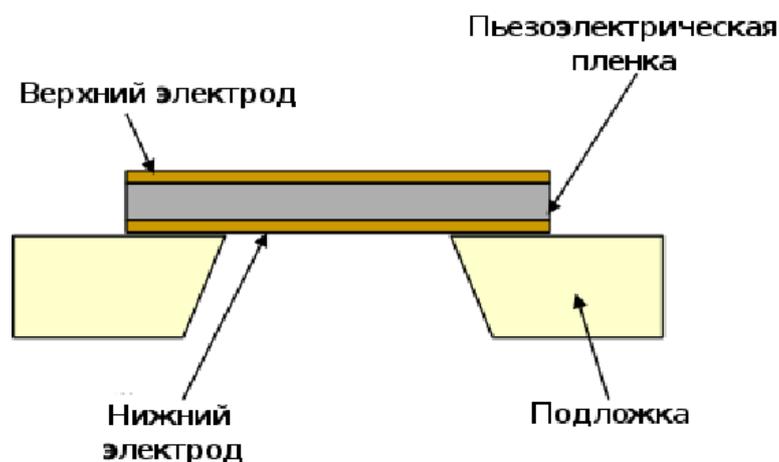


Рис. 1

На сверхвысоких частотах значительно увеличивается требование к точности конструкции резонатора. Изменение толщины электрода на 0.1 мкм влечет за собой изменение резонансной частоты резонатора на сотни мегагерц [1].

Как известно[2], основными параметрами резонатора являются его рабочая частота и показатель качества

$$FOM = K_{эфф}^2 * Q,$$

где  $K_{эфф}^2$  - эффективный коэффициент электромеханической связи,  $Q$  - добротность. Чем выше величина FOM, тем качественнее по параметрам считается резонатор. Величина  $K_{эфф}^2$  прежде всего зависит от качества изготовления пьезопленки (ее пьезосвойства), а добротность  $Q$  резонатора зависит от энергии потерь, связанных со многими механизмами

(акустические потери в материалах активного слоя и электродах, омические потери в материалах электродов, потери, связанные с возбуждением паразитных сдвиговых объемных колебаний и др.).

Для увеличения величины FOM важную роль играет предварительная оптимизация конструкции резонатора и анализ его рабочих параметров. Поэтому важно рассчитать, какой вклад вносит та или иная составная часть устройства в итоговую характеристику. За исключением центральной частоты, при разработке конструкции резонатора необходимо учитывать такие параметры, как добротность, наличие или отсутствие паразитных резонансных пиков и технологичность.

Хорошо зарекомендовавшая себя теория одномерная теория Новотного - Бенеша, берет во внимание только толщины слоев резонатора и не учитывает поперечные размеры и форму электродов и пьезопленки. Наиболее распространенным методом численного решения уравнений пьезоакустики в 3D размерности является метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий, в отличие от одномерной модели, учитывать механизмы потерь, связанные с конструкцией и формой электродов резонатора, возбуждением паразитных сдвиговых колебаний в конструкции и т.д. Результаты 3D моделирования позволяют более точно подойти к оптимизации конструкции резонатора с точки зрения показателя качества FOM. Общая формулировка решения задач пьезоакустики была впервые описана Алликом и Хюгесом [3].

Для исключения факторов воздействия дополнительных элементов модели необходимо в первую очередь сравнить простейшие одномерные модели FBAR-резонаторов мембранного типа. Такой резонатор состоит из пьезоэлектрического слоя и проводящих слоев - электродов, расположенных сверху и снизу пьезопленки (рис. 1). Материал пьезопленки - (0001) AlN толщиной 5 мкм. В качестве верхнего электрода - пленка Al, в качестве нижнего электрода - Mo. Толщина электродов - 0.1 мкм.

Расчет МКЭ-модели производился с помощью программного пакета ANSYS. Конечноэлементная модель показана на рис.2. Для моделирования пьезоэлектрического эффекта используется элемент Solid226 [4]. Это 3D 20-ти узловой 3D конечный элемент. Он позволяет учитывать электрические свойства материалов, что необходимо при моделировании пьезоэффекта.

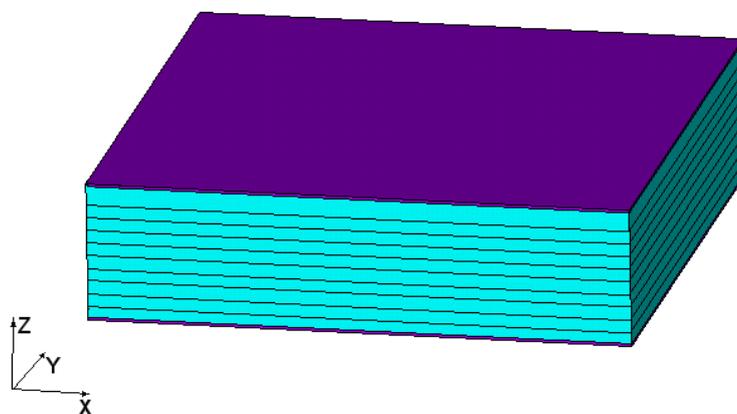


Рис. 2

Поскольку Solid226 принципиально 3D-элемент, для достижения наибольшего совпадения результатов расчетов необходимо наложить на модель условие равенства значений одноименных степеней свободы по X,Y в узловых точках для каждой

координаты  $Z$ . Таким образом, снижается влияние сдвиговых волн и модель практически идентична одномерной.

Для возбуждения продольных акустических волн в направлении оси  $Z$  в качестве граничных условий на поверхности пьезопленки задается потенциал, изменяющийся по гармоническому закону с амплитудой  $V_0 = 1$  на верхней границе между электродом и пьезопленкой, и  $V_1 = -1$  на нижней. Поскольку такое воздействие не приводит к смещению модели как целого, задавать механические граничные условия нет необходимости. Так как в модели Новотного - Бенеша на границе материала с воздухом механические ограничения не накладываются, в МКЭ модели закрепления также отсутствуют.

Для сравнения, такая же модель была рассчитана с помощью модифицированной теории Новотного и Бенеша [5, 7]. Эта теория позволяет рассчитывать резонатор, образованный произвольным количеством произвольно расположенных произвольных слоев с двумя электродами.

На рис. 3 приведены графики модуля проводимости резонатора, рассчитанной с помощью МКЭ модели (1) и теории Новотного-Бенеша(2), в зависимости от частоты.

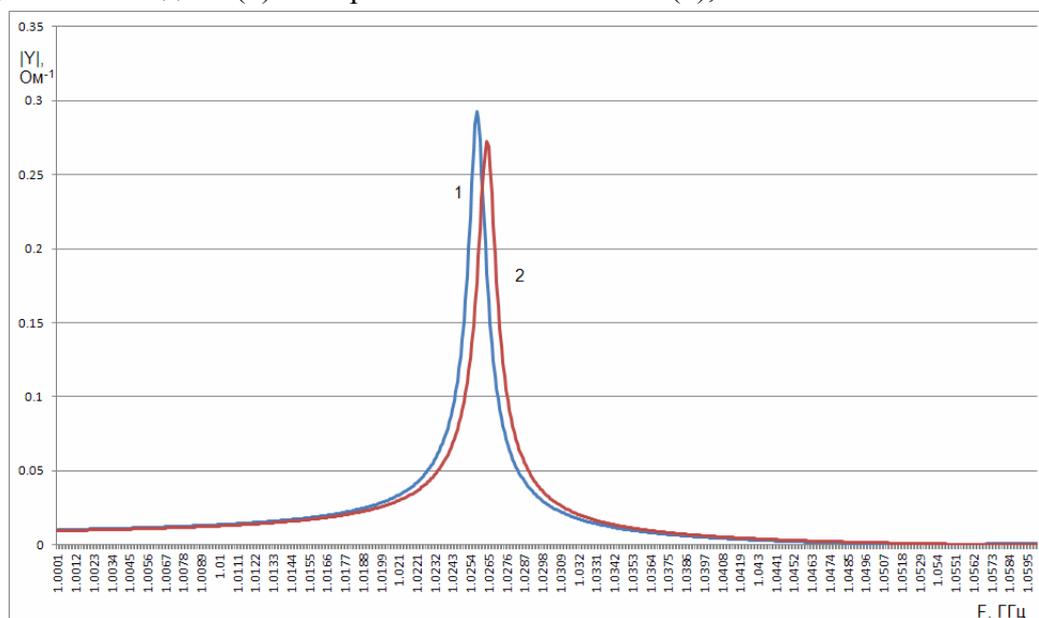


Рис.3

Принцип работы резонатора основан на возбуждении продольной акустической волны в пьезопленке между двумя электродами. Одномерная теория Новотного - Бенеша берет во внимание только толщины слоев и не учитывает поперечные размеры составных частей резонатора. Однако на практике на характеристики резонатора могут повлиять эффекты и явления, возникающие за счёт конечности размеров электродов и пьезослоя. К таким явлениям, прежде всего, относится возбуждение сдвиговых волн и волн лэмба, которые распространяются в направлениях  $X$  и  $Y$  вдоль кристалла.

С этим связано несколько проблем. Во-первых, переотражаясь от краев резонатора, такие волны негативно влияют на амплитудно-частотную характеристику резонатора, что выражается в появлении паразитных пиков проводимости.

Во вторых, на возбуждение волн расходуется энергия, что в свою очередь оказывает влияние на добротность резонатора и, соответственно, на величину FOM.

3D модель имеет такие же размеры и материалы слоев, как и 1D модель, описанная выше, но чтобы обеспечить расчет колебаний, распространяющихся вдоль поверхности пьезопленки, необходимо использовать достаточное количество конечных элементов в направлениях X-Y. На рис. 4 приведен график модуля проводимости резонатора в зависимости от частоты рассчитанный с помощью «одномерной» (1) и трехмерной (2) МКЭ модели.

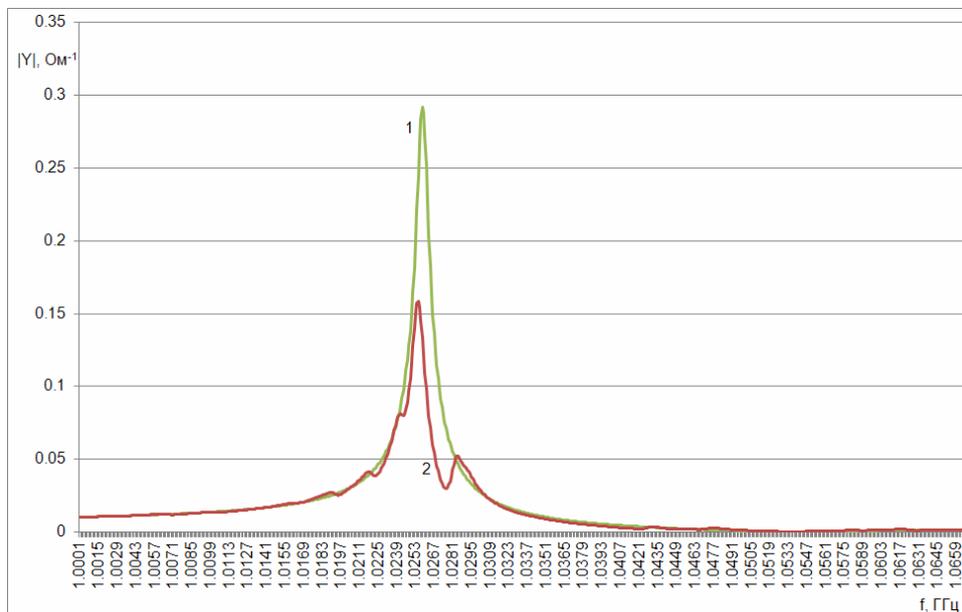


Рис. 4

Как видно, величина модуля проводимости на резонансной частоте для 3D модели меньше, чем для 1D. Кроме того, на графике заметны воздействия сдвиговых волн. Для избавления от этих паразитных эффектов необходима оптимизация конструкции резонатора, а именно формы и размеров резонатора и электродов. На рис.5 приведен график расчетов для разных размеров верхнего электрода и размеров резонатора. (1) – размер резонатора 200 мкм, верхнего электрода 200 мкм. (2) размер резонатора 200 мкм, размер резонатора 400 мкм, (3) – размер резонатора 200 мкм, размер электрода 100 мкм.

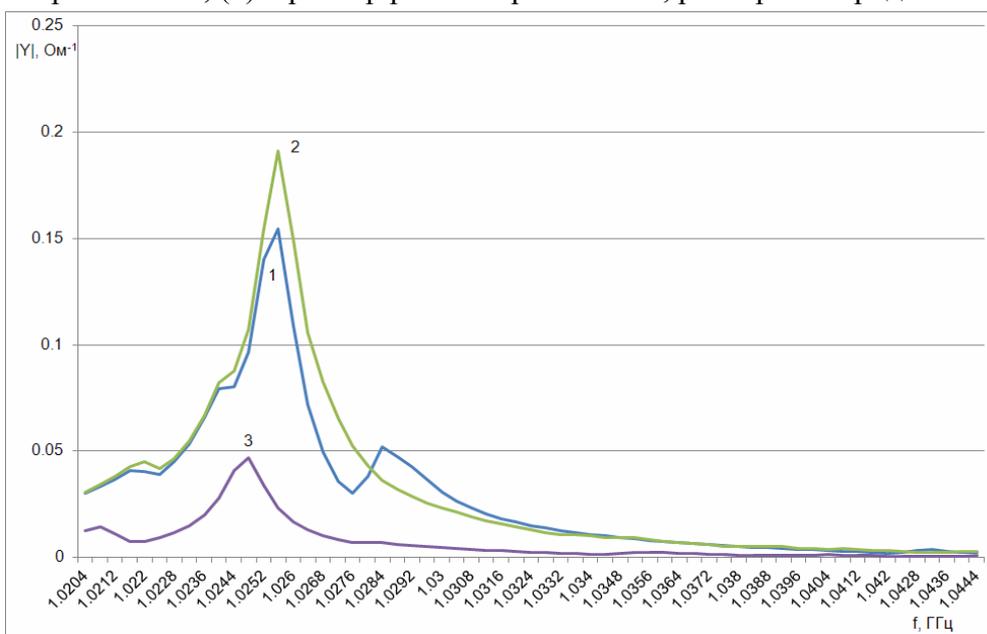


Рис 5.

Как видно, чем меньше соотношение размера верхнего электрода к размерам всего резонатора, тем ровнее амплитудно-частотная характеристика и выше значение  $|Y|$  на резонансной частоте. С другой стороны, чем меньше площадь электрода, тем меньше величина модуля проводимости на резонансной частоте.

На рис. 5. приведены схема распределения компоненты  $u_z$  смещения по плоскости резонатора на резонансной частоте. Как видно, вертикальные смещения наблюдаются не только под плоскостью электрода, но и в свободной от электрода части резонатора, что говорит о возбуждении под воздействием СВЧ сигнала сдвиговых волн.

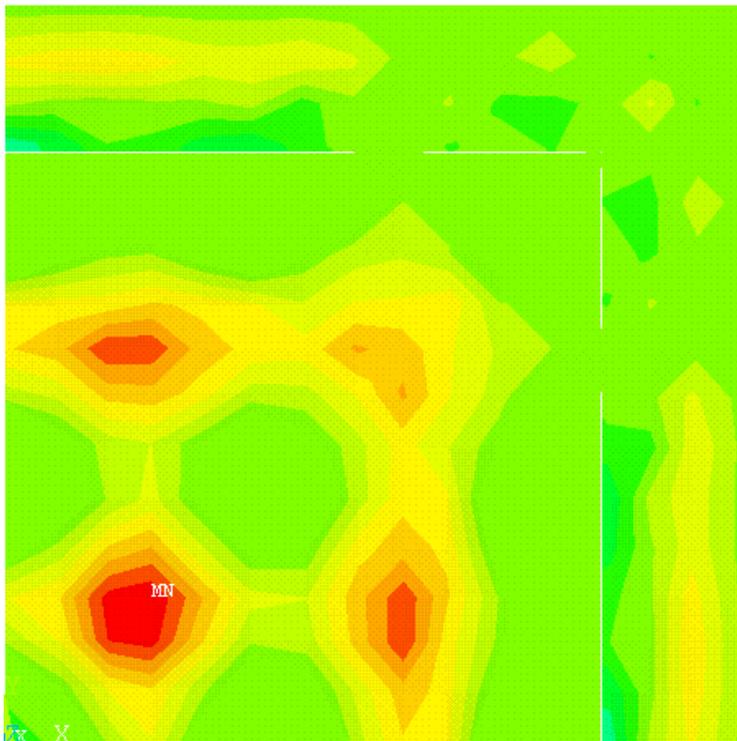


Рис. 5

Таким образом, можно сделать вывод, что 3D-МКЭ модель допустимо использовать для моделирования тонкопленочных одночастотных акустоэлектронных резонаторов. Модель адекватно отображает физические явления и процессы, происходящие в пьезопластине под воздействием СВЧ-сигнала, и их влияние на показатель FOM резонатора.

#### Библиографический список

1. М.Ю Двошерстов, В.И. Чередник, С.И. Босов Расчет и проектирование СВЧ тонкопленочных акустоэлектронных резонаторов на нитриде алюминия // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, ЛЭТИ, 2011.
2. Ruby Rich, San Jose. Review and Comparison of Bulk Acoustic Wave FBAR, SMR Technology // IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P.1029.
3. Allik~H., Hughes~T. // Int. J. Numer. Methods Eng., vol. 2, no. 2, pp. 151-157, 1970.
4. ANSYS Inc.: ANSYS Users Guide, Theory Reference manual. Canonsburg, USA.
5. V. I. Cherednick, M. Y. Dvoesherstov // «Waves in fluids and solids», chapter 3, p.69-80, INTECH open access publisher, 2011, Croatia
6. «V.I.Cherednick», M.Y.Dvoesherstov // «Surface and Bulk Acoustic Waves in Multilayer Structures» Book Waves in fluids and solids. Edited by Ruben Pico Vila. September. 2011. Croatia. Chapter 3. P. 69.
7. Nowotny H., Benes E. // J. Acoust. Soc. Am. PP. 513-521.
8. Allah M., Thalhammer R., Kaitila J., Herzog T., Weber W., et al. Solidly mounted BAW resonators with layer-transferred AlN using sacrificial Si surfaces // A Solid-State Electronics. 2010. V.54. P. 1041.

9. Makkonen~T., Holappa~A., Ella~J., and Salomaa~M.~M // IEEE Ultrasonics Vol. 48, No. 5, pp. 1241-1258, September, 2001.