

# Пьезоэлектрические монокристаллы, используемые в резонаторах, генераторах, фильтрах и датчиках, на объемных акустических волнах

Павел МИЛЕНИН  
Андрей МЕДВЕДЕВ  
Валерий ГРУЗИНЕНКО

**Пьезоэлектрические резонаторы, фильтры, генераторы и датчики на объемных акустических волнах разрабатываются и изготавливаются на основе применения различных монокристаллов кварца ( $\text{SiO}_2$ ), танталата лития ( $\text{LiTaO}_3$ ), ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), цинкита ( $\text{ZnO}$ ), лангасита ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ), берлинита ( $\text{AlPO}_4$ ), тетрабората лития ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ).**

Высококачественный кварц, обладающий безупречной чистотой и кристаллическим совершенством, необходим для изготовления современных и перспективных типов резонаторов (миниатюрных и микроминиатюрных), которые используются в высокостабильных и прецизионных генераторах, СВЧ и перестраиваемых генераторах, широкополосных высокочастотных фильтрах. Общее содержание примесей в используемых для этих целей монокристаллах не должно превышать  $1 \times 10^{-6}$ . Больших успехов в решении этой важнейшей задачи добились ученые и инженеры ОКБ ИС. Сегодня многие потребители искусственного кварца в российских и зарубежных фирмах высоко оценивают качество продукции этого предприятия, добившегося минимальной концентрации примесей ионов Al, Fe, Na, Cu, Li и уменьшения плотности дислокаций до 10 на  $1 \text{ см}^2$  и менее.

При добротности используемого кварца более 5 млн (основная частота 1 МГц) наличие твердых включений не более 10 на  $1 \text{ см}^3$  обеспечивает минимальное влияние на параметры и характеристики резонаторов, особенно на сравнительно невысоких частотах (ниже 25 МГц).

Снижение параметров и искажения характеристик резонаторов наблюдаются в тех случаях, когда включения находятся в активной области при возбуждении на рабочей частоте.

Наличие примесей в кварцевых монокристаллах может явиться причиной повышенного старения и нестабильной частоты и параметров кварцевых резонаторов (и устройств, в которых они используются), особенно при воздействии облучения. Особенно эти эффекты проявляются при использовании кварцевых монокристаллов с большим содержанием Al ( $>5 \times 10^{-6}$ ).

Достигнутый в настоящее время уровень химической чистоты и структурного совершенства выращиваемых высококачественных монокристаллов кварца обеспечивает высокую добротность ( $Q_{ir} > 2,5 \times 10^6$ ), низкое сопротивление, воспроизводимость параметров и характеристик, возможность миниатюризации с сохранением высокой стабильности частоты и параметров кварцевых резонаторов и устройств на их основе, отвечающих высоким эксплуатационным требованиям к механическим, климатическим и радиационным воздействиям.

Высокое качество современных монокристаллов позволяет существенно увеличить скорость процессов формообразования кристаллических элементов за счет уменьшения влияния границ зон роста на ТКЧ, динамическое сопротивление и добротность резонаторов.

Низкий уровень дислокаций обеспечивает повышение механической прочности при процессах распиловки и формообразования кристаллических элементов, особенно при изготовлении высокочастотных резонаторов с мезаструктурными кристаллическими элементами.

Концентрация различных дефектов в кварцевых монокристаллах определяет добротность, другие параметры и характеристики резонаторов, а также стабильность и воспроизводимость основных технологических процессов и выход годных изделий.

В зависимости от требований к изготавливаемым резонаторам и используемым технологиям их изготовления устанавливаются требования к качеству монокристаллов, состав их приемочных испытаний. Для изготовления массовых тиражей резонаторов, к параметрам и характеристикам которых пред-

являются сравнительно невысокие требования, при входном контроле кварца состав приемочных испытаний сравнительно простой и дешевый: визуальный контроль и выборочная проверка стойкости к тепловому удару.

Для обеспечения высокого процента выхода годных резонаторов с качественными параметрами и стабильными характеристиками (низкое сопротивление, высокая частота, воспроизводимые и регулярные температурно-частотные характеристики, минимальное значение емкостного отношения  $C_0/C_1$ , высокая радиационная стойкость, добротность и т. д.) необходимы кварцевые монокристаллы высокого качества: с низкой плотностью дислокаций и примесей, хорошей добротностью  $Q_{ir} > (2,5 \dots 3,5) \times 10^6$ .

Традиционно применяемые при разработках и производстве монокристаллы  $\alpha$ -кварца не всегда позволяют создать новые типы резонаторов и фильтров на объемных акустических волнах. Например, диапазон перестройки кварцевых резонаторов на АТ-срезе для управляемых напряжением генераторов не превышает 0,25% от частоты, а относительная ширина полосы пропускания классического монолитного фильтра на том же срезе не превышает 0,3% от номинальной частоты. Эти параметры резонаторов и фильтров обусловлены физическими свойствами применяемого пьезоэлектрика: его диэлектрической проницаемостью, величиной пьезоэлектрических модулей, упругими свойствами и их температурными коэффициентами.

Применение в качестве подложек монокристаллов танталата лития позволяет реализовать широкие полосы пропускания фильтров (до 4% от номинальной частоты) и обеспечивает большой диапазон перестройки

резонаторов. Однако низкое значение добротности и неудовлетворительное значение температурной стабильности не позволяют реализовать монолитные фильтры с высокими требованиями к крутизне частотной характеристики затухания.

Уникальные свойства пьезоэлектрического монокристалла лантангаллиевого силиката ( $\text{La}_3\text{Ga}_3\text{SiO}_{14}$ ), впервые синтезированного в России в начале 1980-х годов, позволяют создать новые типы пьезоэлектронных устройств, расширить области их использования в новейших устройствах радиоэлектронной техники.

Наличие у монокристалла лангасита температурных коэффициентов материальных констант с противоположными знаками, обуславливает существование срезов с нулевыми значениями температурных коэффициентов частоты первого порядка. Занимая промежуточное положение по величине пьезоэлектрических коэффициентов между кварцем и танталатом лития, колебательные структуры на монокристаллах лангасита имеют высокую добротность и промежуточное значение коэффициента электромеханической связи, позволяющего реализовать «среднеполосные» фильтры в монолитном исполнении.

Отсутствие фазовых переходов вплоть до температуры плавления ( $T_{пл} = 1470^\circ\text{C}$ ), пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических эффектов (точечная группа симметрии 32) открывает широкие возможности для высокотемпературных применений монокристаллов лангасита.

Лангасит обладает рядом свойств, делающих его достаточно технологичным материалом в условиях промышленного производства.

У монокристаллов лангасита отсутствуют энантиоморфные модификации (пространственная группа симметрии P321), что особенно важно при первоначальной ориентировке кристалла. Являясь достаточно мягким материалом (твердость по Моосу 5,0–5,5), ЛГС легко подвергается химическому и ионно-плазменному травлению. Это особенно важно при формировании обратных мезоструктур (ОМС) для высокочастотных акустоэлектронных устройств.

Преимущества резонаторов на монокристаллах ЛГС (лантангаллиевый силикат) и ЛГТ (лантангаллиевый танталат) по сравнению с кварцем:

- 1) меньшее значение величины сопротивления  $R$  (в 2–3 раза), требуется меньше затрат электроэнергии могут работать при слабом токе;
- 2) емкостное соотношение 50–120 (в 4–6 раза меньше), возможно увеличить диапазон перестройки генераторов и расширение полосы пропускания фильтров;
- 3) работоспособность в более широких интервалах температур (до 700–900 °C), работоспособность кварца в диапазоне до 400–500 °C;
- 4) высокая механическая устойчивость;

- 5) меньшие габаритные размеры при аналогичных сопротивлениях  $R$ ;
- 6) в 2–3 раза лучшая долговременная стабильность;
- 7) высокая воспроизводимость температуры экстремума (при изменении угла среза на  $1'$  у ЛГС температура экстремума меняется на 0,25 °C, у кварца (AT и SC) на 5,5 °C);
- 8) меньшее время выхода на режим (меньше габаритные размеры);
- 9) меньше токовая чувствительность;
- 10) меньше фликер-шум;
- 11) обработка в менее агрессивных кислотах (экологическая безопасность);
- 12) более быстрое образование мезоструктуры (скорость травления);
- 13) меньше размер электродов (6–8 толщин КЭ вместо 20 у кварца);
- 14) низкая чувствительность к вакууму;
- 15) лучшая адгезия пленок;
- 16) меньшая чувствительность к ориентации крепления;
- 17) простота управления температурой экстремума;
- 18) возможность применения высокоточных способов формирования кристаллических элементов с использованием лазерных технологий.

Недостатки:

- 1) более высокая стоимость монокристалла;
- 2) крутизна ТХЧ выше ( $K_{кр\text{ут}} = 6 \times 10^{-8}$ ), у кварца  $K_{кр\text{ут}} = 2-3 \times 10^{-8}$ ;
- 3) сложная регенерация (снятие электродов);
- 4) меньшая величина добротности.

Резонаторы на основе монокристаллов ЛГС изготавливаются на частоты от 25 кГц до 70 МГц.

Для создания производства СВЧ-резонаторов от 400 до 1500 МГц перспективно использование пленок сильных пьезоэлектриков ZnO, CdS, AlN, Ta<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1–4). Добротность в таких резонаторах на объемных акустических волнах достигает 5000–15 000.

Ниобат и танталат лития наряду с пьезоэлектрическими свойствами обладают сегнетоэлектрическими свойствами (танталат лития обладает и пьезоэлектрическими свойствами). Оба кристалла применяются при изготовлении пьезорезонаторов, используемых в гене-

раторах, которые управляются по частоте, и широкополосных фильтрах. Ниобатлитиевые резонаторы имеют высокую чувствительность частоты к изменению температуры окружающей среды по сравнению с танталатлитиевыми. Оба типа резонаторов значительно уступают кварцевым, поэтому их использование в пьезотехнике многократно меньше.

Тетраборат лития ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) выращивается методом Чехральского. Пьезоэффект в кристаллах тетрабората лития значительно выше, чем у кварца (примерно в 3–4 раза большая величина коэффициента электромеханической связи). Их производство достаточно дорого, поэтому и использование в пьезотехнике весьма ограничено.

Перспективны (особенно в диапазоне частот 500–1500 МГц) для использования в пьезорезонаторах и фильтрах с применением технологий МЭМС и НЭМС монокристаллы оксида цинка (ZnO).

Эти кристаллы используются для изготовления тонкопленочных преобразователей для возбуждения высокочастотных волн.

В природе кристаллический берлинит не встречается. Используемые в пьезотехнике монокристаллы  $\text{AlPO}_4$  выращиваются как монокристаллы кварца, при высоких давлениях и температурах в автоклавах на затравках, изготовленных из искусственно выращенных монокристаллов.

В заключение следует отметить, что в ближайшие годы доминирующее потребление в пьезотехнике останется за кварцевыми монокристаллами (более 90% мировых объемов производства). ■

## Литература

1. Миленин П., Грузиненко В. Некоторые аспекты производства высокостабильных пьезоэлектрических резонаторов // Наноиндустрия. 2007. № 1.
2. Стандарт ИЕС 758-2004. Синтетические кварцевые кристаллы.
3. Brice J. Crystals for Quartz Resonators // Reviews of Modern Physics. Vol. 57 (1). 1985.
4. Hannon J., Loid P., Smith P. Litium Tantalate and Litium Niobate Piezoelectric Resonators // IEEE Sonic and Ultrasonics. 1970. Vol sn-17, N 4.