

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ

УДК 621.38

## БАЗА ДАННЫХ КВАРЦЕПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2008 г. О. Л. Балышева, Ю. Г. Смирнов, В. В. Клудзин  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

Рассмотрены проблемы создания базы данных (БД) для класса недавно синтезированных кварцеподобных материалов, область применения которых в настоящее время активно расширяется. Рассмотрены кварцеподобные монокристаллы, набор свойств которых обеспечивает их применение в акустоэлектронике и акустооптике в настоящее время и в перспективе. В основу структуры БД положена оригинальная классификация свойств кварцеподобных материалов, разработанная применительно к их использованию в устройствах акустоэлектроники и акустооптики. БД дополнена сведениями о производителях кристаллов, выходными данными научно-технических публикаций и справочной информацией о методах исследования кристаллов. БД предназначена для специалистов, чьи научные интересы связаны с кварцеподобными кристаллами, и будет полезна в образовательных целях.

**Ключевые слова:** кварцеподобные материалы, монокристаллы, материальные константы, база данных, акустоэлектроника.

### Введение

Можно с уверенностью сказать, что в настоящее время информация является фактором, определяющим эффективность любой сферы деятельности, в том числе научных исследований и разработок. Лавинообразное увеличение объемов информации, необходимость организации ее надежного и долговременного хранения, а также возможность оперативного доступа к информации делают разработку информационно-справочных систем и баз данных (БД) актуальной задачей. В последнее время увеличилось число БД, создаваемых в рамках проводимых научных исследований. В связи с этим особенно важна предоставляемая БД возможность оперативного сравнения данных, полученных из различных источников.

Ниже рассмотрена проблема разработки БД кварцеподобных материалов. Изложена суть проблемы, дана краткая историческая справка, отмечено назначение и особенности кварцеподобных материалов, а также необходимость разработки БД. Определены возможности, основные пользователи и перспективы этой разработки.

### Кварцеподобные материалы

Долгое время среди пьезоэлектрических монокристаллов синте-

тический кварц занимал лидирующее положение по частоте применения в устройствах электронной техники [1]. Это объясняется прежде всего его уникальными свойствами, обеспечивающими сочетание пьезоактивности и высокой температурной стабильности характеристик, а также промышленной доступностью и малой стоимостью. Основное применение кварца — это пьезотехника, акустоэлектронные и акустооптические устройства. Существенным недостатком кварца является относительно малое значение коэффициента электромеханической связи (КЭМС), ограничивающее его применение в широкополосных устройствах [1—4]. В связи с этим начались исследования по поиску и синтезу материалов, имеющих температурную стабильность не хуже, чем у кварца, но превосходящих его по другим характеристикам [5]. Для таких материалов стал использоваться термин «кварцеподобные». Кварцеподобные материалы обладают свойствами, схожими со свойствами кварца, и в большинстве случаев обеспечивают получение лучших характеристик изготавливаемых на их основе устройств.

Работа по синтезу материалов, сходных с кварцем, привела к появлению таких монокристаллов, как берлинит (1976 г.), тетраборат лития (1983 г.), фосфат галлия [6].

Настоящим прорывом в этом направлении стало появление в 1982—1983 гг. кристаллов лантан-галлиевого силиката — лангасита. Перспективный пьезоэлектрический кристалл лангасит ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ) относится к группе кристаллов кальций-галлогерманатов ( $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$ ). Возможность получения крупных монокристаллов методом Чохральского и ценные электроакустические характеристики определили перспективы применения лангасита в современных устройствах наряду с широко распространенным кварцем. Такая же, как у кварца, группа симметрии лангасита допускает наличие термостабильных ориентаций, обладающих нулевым температурным коэффициентом частоты (**ТКЧ**) первого порядка, что является необходимым условием при использовании кристалла в термостабильных фильтрах и резонаторах. По величине КЭМС и ТКЧ кристаллы лангасита занимают промежуточное положение между кварцем и сильными пьезоэлектриками типа танталата лития и ниобата лития. Так как КЭМС лангасита более чем в два раза выше, чем у кварца, величина частотной перестройки генераторов, реализованных на лангасите, соответственно больше, чем у кварцевых генераторов. Основное использование этих генераторов — синтезаторы частот. Фильтры на поверхностных акустических волнах (**ПАВ**) и объемных акустических волнах (**ОАВ**), изготавливаемые на подложках из лангасита, имеют хорошие температурно-частотные характеристики и относятся к среднеполосным. Меньшее значение скорости акустических волн обеспечивает фильтрам на лангасите существенное дополнительное преимущество перед кварцевыми и танталолитиевыми фильтрами: меньшие габаритные размеры при тех же или лучших технических характеристиках. Перспективно применение лангасита в качестве подложек ПАВ-фильтров для мобильных систем телекоммуникации, в частности радиотелефонов и базовых станций стандарта W-CDMA, для новых систем цифрового телевидения и др. [3, 4]. Большое значение имеет возможность получения высокой однородности акустических свойств лангасита как у отдельно взятой подложки, так и у подложек, изготовленных из различных кристаллов. В последнее время устройства с подложками из лангасита успешно применяются в различных системах мониторинга. Датчики давления и температуры на основе лангасита имеют существенные преимущества при высокотемпературных измерениях, так как у традиционных материалов ограничен диапазон рабочих температур из-за фазовых переходов [7].

Свойствами, подобными свойствам лангасита, обладают и два его изоморфа — лангатат ( $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$ ) и ланганит ( $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_{14}$ ), появившиеся в 1998 г. [6]. Интенсивные исследования кристаллов семейства лангаситов начались

с 80-х годов XX в. и продолжают в настоящее время. Основной интерес представляют кристаллы, в которых высокие значения КЭМС и малое затухание акустических волн сочетаются с существованием термостабильных срезов. Весьма перспективными в последнее время считаются ориентированные срезы кристаллов семейства лангаситов: такие соединения, как **CNGS** ( $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ ), **CTGS** ( $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ ), **SNGS** ( $\text{SrNbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ ) и **STGS** ( $\text{SrTaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ ), обладающие большим значением КЭМС, меньшими акустическими потерями и рядом других преимуществ [6, 8].

К настоящему времени синтезировано более 100 соединений, принадлежащих к семейству кальций-галлогерманатов, среди которых наибольшее применение пока имеет лангасит. Возможен синтез еще ряда соединений со структурой, аналогичной структуре лангасита. Однако не все из соединений удается получить в виде монокристаллов [9]. Кроме того, далеко не все из имеющихся кристаллов и возможных соединений по совокупности своих электрофизических, электро-механических, диэлектрических, фотоупругих и других свойств могут применяться в электронике и, в частности, в пьезотехнике, акусто- и оптоэлектронике. Поэтому необходимо определить перечень материалов, свойства которых определяют возможность их практического применения.

#### Разработка базы данных.

##### Принципы систематизации информации

Свойства многих кварцеподобных кристаллов хорошо известны и опубликованы во многих работах. Справочную информацию по кристаллам кварца и берлинита можно найти, например, в справочнике [10]. Кристаллам лангасита с момента его появления посвящено несколько сотен статей. Полный набор упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических постоянных лангасита был впервые опубликован в работе [11]. Пьезоэлектрическим, диэлектрическим и другим свойствам лангасита, ланганита и лангатата с численными данными соответствующих констант посвящены и другие работы (например, [12—14]). В работах [15—17] приведены значения материальных констант для соединений CTGS, STGS, SNGS и CNGS. Вопросы, связанные с применением кварцеподобных материалов, и, в частности, кристаллов семейства лангасита, рассмотрены, например, в работах [18, 19]. Некоторые последние обзоры по лангаситу представлены в работах [6, 13]. В работе [20] приведены результаты исследования кристаллов семейства кальций-галлогерманатов.

Во всех работах, посвященных кварцеподобным материалам, можно отметить различие как используемых методов исследования свойств и измерения параметров, так и полученных численных результатов, что привело к обилию раз-

Таблица 1

Кварцеподобные материалы			
Материал	Химическая формула	Кристаллографический класс	Сингония
Кварц	SiO <sub>2</sub>	32	Тригональная
Лангасит (LGS)	La <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> SiO <sub>14</sub>	32	Та же
Ланганит (LGN)	La <sub>3</sub> Ga <sub>5,5</sub> Nb <sub>0,5</sub> O <sub>14</sub>	32	—»—
Лангатат (LGT)	La <sub>3</sub> Ga <sub>5,5</sub> Ta <sub>0,5</sub> O <sub>14</sub>	32	—»—
Берлинит (фосфат алюминия)	AlPO <sub>4</sub>	32	—»—
CNGS	Ca <sub>3</sub> NbGa <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>14</sub>	32	—»—
CTGS	Ca <sub>3</sub> TaGa <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>14</sub>	32	—»—
SNGS	SrNbGa <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>14</sub>	32	—»—
STGS	SrTaGa <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>14</sub>	32	—»—
Фосфат галлия (GP)	GaPO <sub>4</sub>	32	—»—
Тетраборат лития (LBO)	Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	4mm	Тетрагональная

розированных данных и очевидным трудностям работы с ними. Все это и стало основной причиной разработки БД.

На первом этапе разработки БД авторами выделена группа материалов (табл. 1), совокупность свойств которых определяет перспективность их практического использования. Среди этих материалов имеются как уже получившие широкое применение в акустоэлектронике (лангасит, лангатат, ланганит, берлинит, тетраборат лития, фосфат галлия), так и относительно новые соединения (CNGS, CTGS, SNGS, STGS). В рассматриваемую группу включен и кристалл тетрабората лития, имеющий отличный от остальных материалов кристаллографический класс и сингонию. Однако по совокупности физических свойств и с учетом наличия термостабильных ориентаций с большим значением КЭМС этот материал может служить альтернативой кварцу при использовании во многих областях акустоэлектроники. Поэтому целесообразно рассмотреть свойства тетрабората лития наряду с кристаллами тригональной сингонии. Следует отметить и кристалл лантан-кальциевого оксобората (LaCOB), привлекающий в последнее время внимание за счет своих оптических свойств. Исследования показали, что этот кристалл может быть интересен и для применения в акустоэлектронике. Например, в работе [21] определены материальные константы и характеристики ПАВ и псевдоповерхностных волн в этом материале. Полученные результаты дают основание считать возможным в перспективе его использование для ПАВ-устройств наряду с тетраборатом лития и лангаситом. В дальнейшем перечень кристаллов, информация о которых содержится в БД, может быть дополнен.

На втором этапе разработки были определены тематические разделы, по которым систематизируется информация. Для выделенной группы материалов важнейшей является информация о свойствах с численными данными различных кон-

стант. Большое значение в научных исследованиях имеет работа с научно-технической литературой. Обилие справочной информации и различия численных данных существенно осложняют поиск необходимых сведений. Целесообразно систематизировать сведения о литературе, посвященной кварцеподобным материалам, и предоставить информацию об источнике данных с указанием использованного способа измерения или расчета констант, так как интерес представляют не только численные данные, но и используемые методы экспериментальных или теоретических исследований. Применение кварцеподобных материалов для подложек при создании различных устройств требует сведений о характеристиках кристаллов, выпускаемых промышленностью в настоящее время. Часть БД является раздел, связанный с производством. Таким образом, информация в разрабатываемой БД систематизирована по следующим разделам.

1. Материалы.
2. Свойства.
3. Литература.
4. Производство.
5. Методы исследования.

### Свойства кварцеподобных материалов

Уравнения состояния кристаллов, учитывающие их упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические свойства [2, 22, 23], могут быть записаны в следующем виде:

$$T_i = c_{ij}^E S_j - e_{ki} E_k; \quad D_k = e_{kj} S_j + \epsilon_{kn}^S E_n; \quad (1)$$

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{kj} E_k; \quad D_k = d_{kj} T_j + \epsilon_{kn}^T E_n, \quad (2)$$

где  $T_i$  и  $S_j$  — компоненты тензоров упругих напряжений и деформаций ( $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ) соответственно;  $D_k$  и  $E_n$  — компоненты векторов электрического смещения и напряженности электрического поля ( $k, n = 1, 2, 3$ ) соответственно. Постоянные коэффициенты, связывающие между собой упругие и электрические переменные уравнений (1) и (2) принято считать материальными константами кристаллов. При этом коэффициенты  $c_{ij}^E$  — упругие модули (или коэффициенты жесткости);  $s_{ij}^E$  — упругие константы (или коэффициенты податливости);  $e_{kj}$  — пьезоэлектрические константы;  $d_{kj}$  — пьезоэлектрические модули;  $\epsilon_{kn}^S$  и  $\epsilon_{kn}^T$  — коэффициенты диэлектрической проницаемости. Верхний индекс в обозначениях материальных констант показывает условия их определения, как это и следует из уравнений состояния (постоянство напряженности электричес-

кого поля « $E$ » для упругих коэффициентов и постоянство напряжений « $T$ » или деформаций « $S$ » для диэлектрической проницаемости).

Набор упругих коэффициентов удобно представлять в виде диагонально симметричной матрицы размерности  $6 \times 6$ , набор пьезоэлектрических коэффициентов — в виде матрицы  $3 \times 6$ , а набор диэлектрических констант — в виде диагонально симметричной матрицы  $3 \times 3$ . Число независимых и ненулевых элементов этих матриц варьируется в зависимости от класса симметрии кристалла [5, 22]. На практике удобно применять сводную упругопьезодиэлектрическую матрицу размерностью  $9 \times 9$ , объединяющую три матрицы перечисленных выше материальных констант.

Выражение (3) представляет собой упругопьезодиэлектрическую матрицу материальных констант, входящих в уравнения (1) и (2), для кристаллов тригональной сингонии, к которой относятся большинство кварцеподобных материалов:

$$\begin{array}{cccccc|ccc} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 & e_{11} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & 0 & 0 & -e_{11} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & 0 & e_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} & 0 & -e_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{14} & c_{66} & 0 & -e_{11} & 0 \\ \hline e_{11} & -e_{11} & 0 & -e_{14} & 0 & 0 & \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{14} & -e_{11} & 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{array}, \quad (3)$$

где  $c_{66} = 0,5(c_{11} - c_{12})$ .

Свойства кристаллов класса 32 характеризуются с помощью [2, 22, 23] шести независимых коэффициентов жесткости ( $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{13}$ ,  $c_{14}$ ,  $c_{33}$ ,  $c_{44}$ ), двух пьезоэлектрических констант ( $e_{11}$ ,  $e_{14}$ ) и двух коэффициентов диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{33}$ ).

Упругопьезодиэлектрическая матрица тетрабората лития (кристалла класса  $4mm$  [22]), содержит шесть независимых коэффициентов жесткости ( $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{13}$ ,  $c_{33}$ ,  $c_{44}$ ,  $c_{66}$ ), три пьезоэлектрические ( $e_{15}$ ,  $e_{31}$ ,  $e_{33}$ ) и две диэлектрические константы ( $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{33}$ ). Кроме самих констант, свойства кристаллов характеризуются с помощью температурных коэффициентов, показывающих относительное изменение константы при изменении температуры на один градус [3, 4, 22].

На сегодняшний день и в перспективе устройства на ПАВ и ОАВ составляют значительную часть применения кварцеподобных материалов, поэтому целесообразно выделить основные параметры, знание которых необходимо для использования таких материалов в этой области. Так, например, скорости акустических волн в кристаллах определяют рабочие частоты изготавли-

ваемых устройств и их габаритные размеры. От величины коэффициента электромеханической связи зависят относительная ширина полосы пропускания устройств и вносимые потери. В устройствах с повышенными требованиями к температурной стабильности желательно применять материалы с малыми величинами температурных коэффициентов (скорости, частоты, задержки). Более подробную информацию о параметрах кристаллов, их связи с техническими характеристиками устройств на ПАВ, а также значения некоторых констант для кварцеподобных монокристаллов можно найти, например, в обзорной работе [24].

Полный набор и описание оптических свойств кристаллов представляется сложной и объемной задачей, трудно поддающейся унификации. Поэтому ниже рассмотрены лишь некоторые общезначимые характеристики, которые представляются важными на этапах исследования, разработки и тестирования акустоэлектронных и акустооптических устройств.

Оптические свойства кристаллов в общезначимом плане характеризуются показателем преломления  $n$  и его зависимостью от длины оптической волны  $\lambda$ , двулучепреломлением  $\Delta n$  для одноосных и двуосных кристаллов, спектральным диапазоном прозрачности  $\Delta\lambda$  и количественными параметрами поглощения оптической волны в выбранном диапазоне [10].

Показатель преломления определяет скорость распространения световой волны в данной среде, а также параметры отражения и преломления света на границе раздела двух сред. В общем случае он описывается диагональной матрицей размерностью  $3 \times 3$ . Для кристаллов высшей симметрии (одноосных кристаллов) угловая зависимость показателей преломления для ортогональных положений поляризации оптического луча  $n_0$  и  $n_l$  задается индикатриссой. Как параметр используется  $\Delta n = |n_0 - n_l|$  — максимальное двулучепреломление кристалла. Показатель преломления слабо меняется в пределах диапазона прозрачности материала и резко — на границах этого диапазона, что определяет дисперсию среды.

Диапазон оптической прозрачности материала  $\Delta\lambda$  определяет интервал длин волн оптического излучения, в пределах которого поглощение света минимально. При этом обычно задается средний уровень коэффициента поглощения на единицу длины пути светового луча.

Уравнение для определения фотоупругого эффекта имеет вид

$$\Delta B_i = p_{ij} S_j, \quad (4)$$

где  $\Delta B_i$  — компоненты изменений диэлектрической (оптической) непроницаемости кристалла, обусловленных упругим воздействием;  $p_{ij}$  — фо-

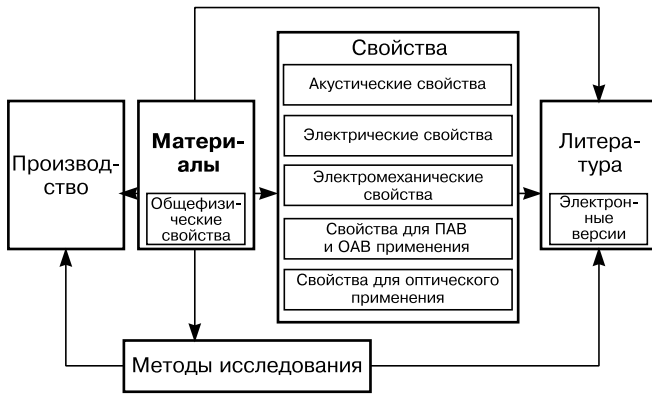


Рис. 1. Структура организации БД свойств кварцеподобных материалов

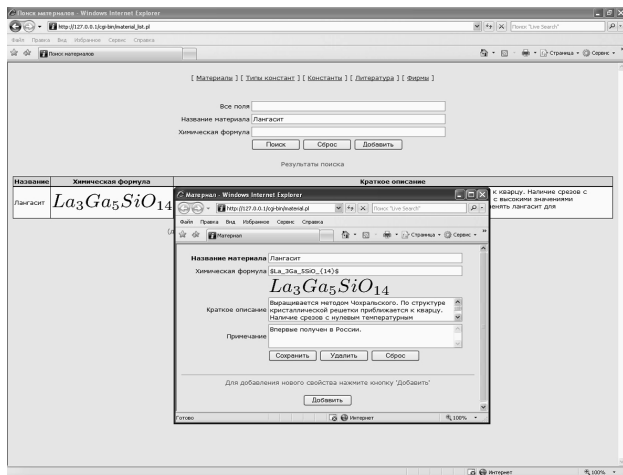


Рис. 2. Результат поиска в разделе «Материалы»

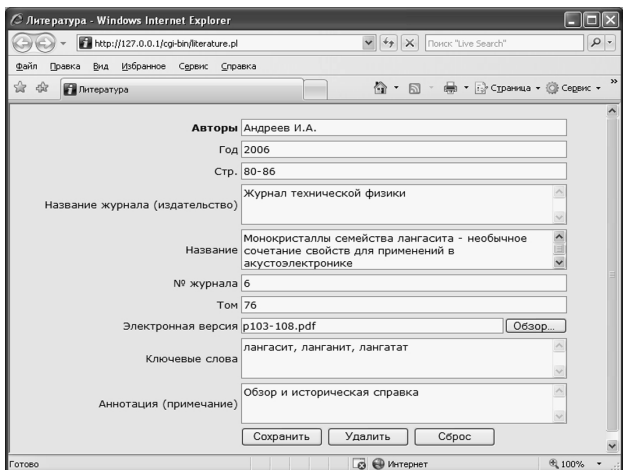


Рис. 3. Пример работы с БД в разделе «Литература»

тоупругие коэффициенты. Набор фотоупругих коэффициентов можно представить в виде матрицы размерностью  $6 \times 6$ , которая в отличие от матрицы упругих констант не является диагонально симметричной. Принято считать, что

$$\Delta B = \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_0^2}, \quad (5)$$

где  $n_0$ ,  $n$  — значения показателя преломления при отсутствии и при наличии деформации соответственно.

На практике широко используется интегральная акустооптическая характеристика кристаллов — показатель акустооптического качества

$$M_2 = \frac{n_o^3 n_e^3 (p'_{ij})^2}{\rho V^3}, \quad (6)$$

где  $n_o^3$  и  $n_e^3$  — показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волны соответственно;  $p'_{ij}$  — значение действующего фотоупругого коэффициента для выбранной геометрии взаимодействия между светом и звуком;  $\rho$  — плотность кристалла;  $V$  — скорость акустической волны, задающей деформацию.

Перечень констант, характеризующих свойства кварцеподобных материалов, приведен в табл. 2.

### Структура базы данных

Укрупненная структура БД представлена на рис. 1.

В разделе «Материалы» приведен перечень материалов с их краткой характеристикой, а также некоторые общезначимые свойства кристаллов (например, кристаллографический класс, твердость по шкале Мооса, плотность, температура плавления и фазовых переходов и др. [10]). На рис. 2. представлен результат поиска в разделе «Материалы».

В разделе «Свойства» систематизированы свойства кварцеподобных материалов по следующим группам:

- акустические (упругие) свойства;
- электрические свойства;
- электромеханические свойства;
- некоторые свойства, важные для применения в устройствах на ПАВ и ОАВ;
- оптические свойства.

Основное внимание уделено материальным константам кристаллов и параметрам, знание которых необходимо для применения в акустоэлектронике.

В разделе «Литература» приведены сведения о монографиях, справочниках, научно-технических статьях, трудах симпозиумов и конференций, содержащих информацию о свойствах и областях применения кварцеподобных материалов. В этом разделе на момент подготовки рукописи статьи собрана информация о более чем 200 литературных источниках, посвященных кварцеподобным материалам. Большинство публикаций в этом разделе имеют полнотекстовые электронные версии. На рис. 3 показан пример работы с БД в разделе «Литература».

В разделе «Производство» содержится информация о фирмах — производителях кристаллов. На сайтах этих фирм можно найти спецификации на выпускаемую продукцию и необходимую

Таблица 2

## Константы, характеризующие свойства кварцеподобных материалов

Параметр	Обозначение	Размерность	Примечание
<i>Общезфизические свойства</i>			
Твердость по шкале Мооса	$M$	1	—
Плотность	$\rho$	г/см <sup>3</sup>	—
Температура плавления	$T_o$	°С	—
Температура фазового перехода	$T_f$	°С	—
Коэффициент теплового расширения первого порядка	$\alpha_i^{(1)}$	1/°С	—
<i>Упругие (акустические) свойства</i>			
Упругое напряжение	$T_i$	Н/м <sup>2</sup>	—
Упругая деформация	$S_i$	Безразмерная величина	—
Упругие модули (коэффициенты жесткости), определенные при постоянной напряженности электрического поля	$c_{ij}^E$	Н/м <sup>2</sup>	$c_{ij} = \frac{\partial T_i}{\partial S_j}$
Упругие модули (коэффициенты жесткости), определенные при постоянном электрическом смещении	$c_{ij}^D$	Н/м <sup>2</sup>	$c_{ij} = \frac{\partial T_i}{\partial S_j}$
Температурные коэффициенты упругих констант	$Ts_{ij}^E, Ts_{ij}^D$	1/°С	—
Температурные коэффициенты упругих модулей	$Tc_{ij}^E, Tc_{ij}^D$	1/°С	—
Упругие константы (коэффициенты податливости), определенные при постоянной напряженности электрического поля	$s_{ij}^E$	м <sup>2</sup> /Н	$s_{ij} = \frac{\partial S_i}{\partial T_j}$
Упругие константы (коэффициенты податливости), определенные при постоянном электрическом смещении	$s_{ij}^D$	м <sup>2</sup> /Н	$s_{ij} = \frac{\partial S_i}{\partial T_j}$
<i>Электрические свойства</i>			
Напряженность электрического поля	$E_k$	В/м	—
Электрическое смещение	$D_k$	Кл/м <sup>2</sup>	—
Диэлектрическая проницаемость, определенная при постоянном упругом напряжении	$\epsilon_{kn}^T$	Ф/м	$\epsilon_{kl} = \frac{\partial D_k}{\partial E_n}$
Диэлектрическая проницаемость, определенная при постоянной деформации	$\epsilon_{kn}^S$	Ф/м	$\epsilon_{kl} = \frac{\partial D_k}{\partial E_n}$
Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости	$T\epsilon_{kn}^T, T\epsilon_{kn}^S$	1/°С	—
Относительная диэлектрическая проницаемость	$\epsilon_{kn}^T/\epsilon_0, \epsilon_{kn}^S/\epsilon_0$		$\epsilon_0 = 8,855 \text{ пФ/м}$
<i>Электро-механические (пьезоэлектрические) свойства</i>			
Пьезоэлектрические константы	$e_{ki}$	Кл/м <sup>2</sup>	$e_{kj} = \frac{\partial D_k}{\partial S_j}$
Пьезоэлектрические модули	$d_{ki}$	м/В	$d_{kj} = \frac{\partial S_j}{\partial E_k}$
Коэффициенты электро-механической связи	$k_{ki}$	Безразмерная величина	—
<i>Некоторые свойства, важные для применения в устройствах на ПАВ и ОАВ</i>			
Углы Эйлера, определяющие плоскость и направление	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	угл. град.	—
Скорость ПАВ	$V$	м/с	—
Скорость ОАВ	$V_L, V_{S1}, V_{S2}$	м/с	$V_L$ — продольная; $V_{S1}$ — быстрая поперечная; $V_{S2}$ — медленная поперечная волна
Квадрат коэффициента электро-механической связи для ПАВ	$k^2$		$k^2 = \frac{2\Delta V}{V}$
Фактор электро-механической связи для ОАВ	$k_e$	1	—
Температурный коэффициент задержки	ТКЗ	1/°С	—
Температурный коэффициент скорости	ТКС	1/°С	—
Угол отклонения потока энергии	$\psi$	угл. град.	—
Погонная емкость одной пары электродов	$C_2$	пФ/м	—
<i>Оптические свойства</i>			
Фотоупругие коэффициенты	$p_{ij}$		$p_{ij} = \frac{\partial(\Delta B_i)}{\partial S_j}$
Показатели преломления (обобщенные)	$n_0, n_1$		—
Границы диапазона оптической прозрачности	$\lambda_1, \lambda_2$	мкм	—
Показатель акустооптического качества	$M_2$	мкс <sup>3</sup> /г	$M_2 = \frac{n_o^3 n_e^3 (p'_{ij})^2}{\rho V^3}$

*Примечание.*  $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ;  $k, n = 1, 2, 3$ .

информацию о технологии производства и применении кристаллов.

В разделе БД «Методы исследования» содержится справочная информация о применяемых методах экспериментального и теоретического исследования свойств и определения констант кристаллов кварцеподобных материалов. Так, например, известно, что оптические методы исследования материалов являются наиболее тонкими и чувствительными методами, отражающими возможные деформации наименее инерционной электронной структуры кристаллической решетки. Поэтому результаты оптических исследований материалов, хотя и сложным образом, но коррелируют с данными, полученными другими способами исследований. Наиболее наглядно это можно продемонстрировать при акустооптическом взаимодействии, при котором наведенные деформации кристаллической решетки выявляются в изменении оптических параметров среды. Информационное наполнение раздела «Методы исследования» будет осуществляться в ходе пополнения БД информацией о свойствах кристаллов.

### Заключение

Работы по исследованию свойств кварцеподобных материалов, разработке устройств на их основе продолжают оставаться актуальными благодаря достигнутым результатам и хорошим перспективам.

Разрабатываемая БД предоставляет возможность автоматизированного поиска, выбора информации о кварцеподобных материалах. Такая информация необходима исследователям, разработчикам и другим специалистам, чьи научные интересы связаны с кварцеподобными кристаллами. Модульный принцип организации обеспечивает возможность дальнейшего дополнения БД новыми разделами.

Содержащаяся в БД информация может использоваться как в научных, так и в образовательных целях, в качестве справочного и иллюстративного материала соответствующих специализированных курсов лекций для студентов и аспирантов.

### Библиографический список

1. *Ripple Clemens C. W., Fjeldly Tor A.* Advances in Surface Acoustic Wave Technology, Systems and Applications. – Singapore; New Jersey; London; Hong Kong: World Scientific, 2000. – V. 1. 313 p.
2. *Hashimoto Ken-ya.* Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunication: modeling and simulation. – Berlin: Springer-Verlag, 2000. – 330 p.
3. *Morgan D.* Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. – Oxford: Acad. Press, 2007. – 430 p.

4. *Campbell C. K.* Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications. – San Diego (USA): Acad. Press, 1998. – 632 p.

5. *Ripple Clemens C. W., Fjeldly Tor A.* Advances in Surface Acoustic Wave Technology, Systems and Applications. – Singapore; New Jersey; London; Hong Kong: World Scientific, 2001. – V. 2. 361 p.

6. *Андреев И. А.* К 20-летию обнаружения термостабильных упругих свойств кристалла  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  и появления термина «лангасит» (Обзор). // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 9. С. 1–3.

7. *Fachberger R., Bruckner G., Knoll G., Hauser R., Biniash J., Reindl L.* Applicability of  $\text{LiNbO}_3$ , Langasite and  $\text{GaPO}_4$  in high temperature SAW sensors operating at radio frequencies. // IEEE Trans. UFFC. 2004. V. 51. N 11. P. 1427–1431.

8. *Chou M. M. C., Shen Jen, Chai B. H. T.* New Ordered Langasite Structure Compounds – Crystal Growth and Preliminary Investigation of the Material Properties. // IEEE Ultrasonic Symp. Proc. 2001. P. 225–230.

9. *Сорокин Б. П., Глушков Д. А., Безматерных Л. Н., Тимеров В. Л., Гудим И. А., Александров К. С.* Электромеханические свойства пьезоэлектрических кристаллов  $\text{Pb}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$ , выращенных из раствора в расплаве. // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 3. С. 446–448.

10. Акустические кристаллы. Справочник. / Под ред. М. П. Паскольской. – М.: Наука, 1982. – 632 с.

11. *Каминский А. А., Миль Б. В., Сильвестрова И. М.* и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1983. Т. 47. № 10. С. 1903–1908.

12. *Stade J., Bohaty L., Hengst M., Heimann R. B.* Electro-optic, Piezoelectric and Dielectric Properties of Langasite ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ), Langanite ( $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_{14}$ ) and Langataite ( $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$ ). // Cryst. Res. Technol. 2002. V. 37. N 10. P. 1113–1120.

13. *Андреев И. А.* Монокристаллы семейства лангасита – необычное сочетание свойств для применений в акустоэлектронике. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 6. С. 80–86.

14. *Chilla E., Flannery C. M., Frohlich H. J.* Elastic properties of langasite-type crystals determined by bulk and surface acoustic waves. // J. Appl. Phys. V. 90. N 12. P. 6084–6091.

15. *Chilla E., Kunze R., Weihnacht M., Bohm J., Heilmann R. B., Hengst M., Straube U.* Acoustic waves measurements on SNGS crystals and determination of material constants. // IEEE Ultrasonic Symp. Proc. 2003. P. 92–95.

16. *Adachi M., Sato R., Karaki T.* Temperature Compensated Langasite Family Compound  $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$  Crystal for SAW Applications. // Ibid. 2004. P. 1984–1987.

17. *Chou M. M. C., Shen Jen, Chai B. H. T.* Investigation of Crystal Growth and Material Constants of Ordered Langasite Structure Compounds. // IEEE Internat. Frequency Control Symp. and PDA Exhibition. 2001. P. 250–254.

18. *Cunha M. P., Fagundes S. A.* Investigation on recent Quartz-like materials for SAW applications. // IEEE Trans. UFFC. 1999. V. 46. N 6. P. 1583–1589.

19. *Ji X., Han T., Shi W., Zhang G.* Investigation on SAW Properties of LGS and Optimal Cuts for High-Temperature Applications. // Ibid. 2005. V. 52. N 11. P. 2075–2079.

20. *Mill B. V.* Two New Lines of Langasite Family Compositions. Proc. // IEEE Internat. Frequency Control Symp. and PDA Exhibition. 2001. P. 255–261.

21. *Shimizu H., Takeda H., Nishida T., Okamura S., Shiosaki T.* Evaluation of Material Constants and SAW Properties in  $\text{LaCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  Single Crystals. // IEEE Ultrasonics Symp. 2004. P. 1218–1222.

22. *Зеленка И.* Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

23. *Дьялесан Э., Руайе Д.* Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. – М.: Наука, 1982. – 424 с.

24. *Бальшева О. Л., Коновалова Л. П., Кулаков С. В., Смирнов Ю. Г.* Современные материалы для устройств на поверхностных акустических волнах. // Радиотехника. 2005. № 8. С. 25–31.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05–07–90078–в).