

стижимо это при дуговом разряде. Для получения ПБС используют конструкции с электродом-расширителем [8].

Заключение. Анализ характеристик ПБС, формируемых в ПИЭЛ с полым катодом и в скрещенных $E \times H$ полях, показывает перспективность дальнейшей разработки новых и модернизации существующих конструкций электронно-лучевых устройств, формирующих ПБС для реализации технологий электронно-лучевой обработки больших поверхностей, в том числе с целью получения не только электронных и ионных пучков в отдельности, но так же создания электродной структуры с совместным формированием электронных и ионных пучков.

1. Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1977. – 145 с.
2. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко [и др.], под общ. ред. В.Т. Барченко // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
3. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом / Е.М. Окс. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
4. Plasma emission systems for electron- and ion-beam technologies / D. Antonovich, V. Gruzdev, V. Zaleski, I. Pobol & P. Soldatenko // High Temperature Material Processes 21(2):143–159 (2017)
5. Белюк С.И., Осипов И.В., Ремпе Н.Г. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером // Изв. ВУЗов. Физика. – 2001. – Т. 44, № 9. – С. 77–84.
6. Шипко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.
7. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // ИФЖ. – 2002. – Т. 75, № 3. – С. 166–170.
8. Антонович, Д.А. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 2 / Д.А. Антонович и [др.] // Вестник ПГУ. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2017. – № 4. – С. 45 – 51

РОСТОВАЯ СТРУКТУРА КРИСТАЛЛОВ TGS, ПОСЛОЙНО ЛЕГИРОВАННЫХ ПРИМЕСЬЮ ХРОМА И *L*- α -АЛАНИНА

*А.Л. Толстихина¹, Р.В. Гайнутдинов¹, Б.С. Роцин¹, А.К. Лашкова¹,
В.Н. Шут³, С.Е. Мозжаров³, И.Ф. Кашевич²*

¹Москва, Институт кристаллографии имени А.В. Шубникова РАН

²Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова

³Витебск, ВГТУ

Периодическая регулярная доменная структура (РДС), созданная в кристаллах сегнетоэлектриках, привлекает к себе внимание тем, что дает возможность использовать электрооптический эффект для управления световым лучом без применения поляризационной оптики, а также реализовать нелинейное оптическое взаимодействие в условиях квазисинхронизма [1]. Одним из ростовых методов получения РДС является модулированное легирование примесями кристалла во время его роста, т.к. в большинстве случаев это приводит к корреляции доменной и примесной структур [2]. Здесь важным является строгий контроль пространственной периодичности доменов с противоположным 180-градусным направлением вектора поляризации в соседних слоях. Это в свою очередь связано с разработкой и применением неразрушающих методик исследования примесной ростовой структуры в таких неоднородных кристаллах.

Свойства сегнетоэлектрических кристаллов триглицинсульфата (TGS) существенно зависят от вводимых примесей, поэтому до сих пор продолжают работы по изучению влияния на них различных добавок в раствор и условий кристаллизации. В последнее время для управления свойствами сегнетоэлектриков стали применяться методики профильного легирования, которые демонстрируют новые возможности [3].

Целью работы было комплексное исследование ростовой полосчатой структуры кристаллов триглицинсульфата, послойно легированных примесью хрома и *L*- α -аланина методами силовой микроскопии пьезоотклика и сканирующей емкостной силовой микроскопии.

Материал и методы. Материалом для исследования являлись сегнетоэлектрические кристаллы семейства триглицинсульфата (TGS) с периодической структурой из чередующихся ростовых полос номинально чистого TGS и легированных неизоморфной примесью ионов хрома (TGS–TGS+Cr) и изоморфной примесью *L*- α -аланина (TGS–TGS+LATGS), которые были выращены скоростным методом при постоянной температуре роста 31.4°C. Кристаллы TGS–TGS+Cr выращены при концентрации хрома в растворе 5 мас. %, TGS–TGS + LATGS – при концентрации примеси *L*- α - аланина 25 мас. %.

Поверхность образцов изучали с помощью сканирующего зондового микроскопа NTEGRA Prima (НТ-МДТ). Поиск границ полос с примесью и без осуществлялся методами силовой микроскопии пьезоотклика (СМП) и сканирующей емкостной силовой микроскопии (СЕСМ) с использованием кремниевых кантилеверов (НА_FM/Pt, балка В, Tipsnano, Эстония), покрытых Pt, со следующими характеристиками: резонансная частота $f = 140$ кГц, жесткость $k_{tip} = 3.5$ Н/м, радиус закругления острия $R < 30$ нм. Использование зондовой микроскопии для исследования ростовой примесной структуры было связано с тем, что размеры полос составляли от 100 до 700 мкм, а в случае изоморфной примеси аланина не определялись методами оптической микроскопии.

Распределение примеси в кристаллах контролировалось методами рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) (TGS–TGS+ Cr) и рентгеновской топографии (РТ) (TGS–TGS+LATGS). Для исследования методом РФА использовался дифрактометр “ДРШ” с двумерным детектором. Методом РТ измерения проводились на дифрактометре “ДИТОМ-М” с двумерным детектором. Исследования были выполнены в Институте кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН. Подробное описание этих методик представлено в работах [3].

Результаты и их обсуждение. Методы РФА и РТ позволяют оценить степень равномерности вхождения примеси в объеме кристаллов, а также установить ширину легированной и чистой полосы, что в дальнейшем упрощает поиск границ с помощью АСМ. В случае кристаллов TGS–TGS+Cr ширина полосы с примесью составила около 700 мкм, содержание хро-

ма около 0.12 вес %. Ширина полосы без примеси составила около 400 мкм, содержание хрома не превышает 0.01 вес.%. Для обнаружения границы легированных и чистых полос применялись методы СМП и СЕСМ, которые позволяют успешно выявлять такие границы в кристаллах TGS–TGS+Cr как на поли-, так и на монокристаллических участках.

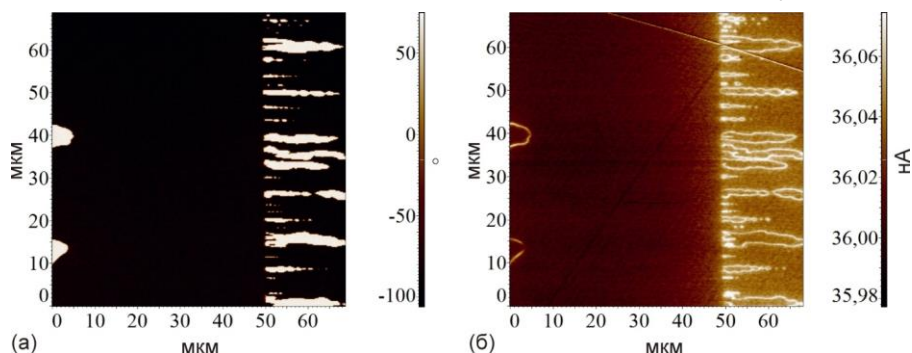


Рисунок 1 – Изображение участка поверхности кристалла TGS–TGS+Cr с полосой TGS слева и TGS+Cr справа: (а) – МПО, (б) – СЕСМ

На рисунке 1 приведены изображения границы легированной и чистой полосы для исследуемого кристалла, полученные методами СМП (рисунок 1а) и СЕСМ (рисунок 1б). Видно, что на границе полос происходит резкое изменение морфологии доменной структуры, кроме того, СЕСМ демонстрирует изменение контраста на чистой и легированной полосах.

По результатам исследования кристалл TGS–TGS + LATGS оказался монокристаллическим, поэтому разделить легированные и чистые полосы исходя из морфологии доменной структуры не представлялось возможным. Однако на амплитудных изображениях пьезоотклика наблюдаются участки поверхности с ярко выраженным изменением контраста, причем граница между ними достаточно прямая и ровная (рисунок 2а). Подробное изучение таких границ показало: что они параллельны грани роста кристаллов, и при перемещении перпендикулярно им наблюдается пространственная модуляция контраста с периодом около 200 мкм, что находится в хорошем соответствии с данными рентгеновской топографии.

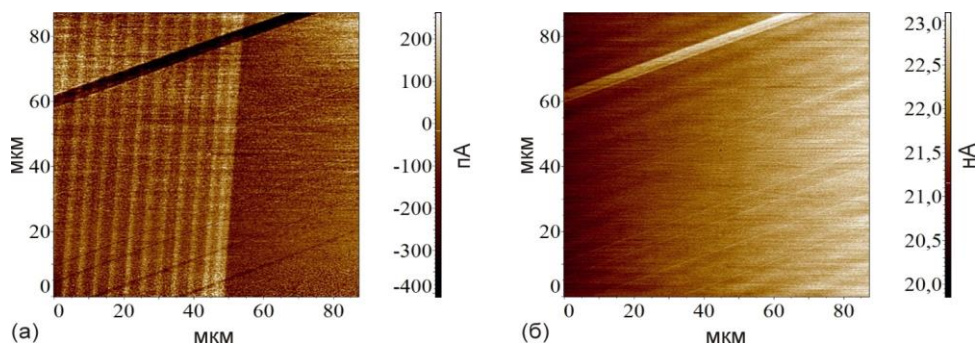


Рисунок 2 – Изображение участка поверхности кристалла TGS–TGS + LATGS с полосой TGS слева и TGS + LATGS справа: (а) – МПО, (б) – СЕСМ

Молекулы α -аланина несколько больше молекул глицина, и встраивание их в решетку приводит к возникновению дополнительных локальных полей механических напряжений. Поэтому темный контраст дают полосы с примесью. Ширина полос TGS составила 200–250 мкм, TGS+LATGS – 150–200 мкм. Здесь также возможно наблюдать макроскопические области различного контраста.

Заключение. Таким образом, СМП-изображения являются наиболее информативными для выявления ростовой примесной структуры как для полидоменных так и монокристаллических неоднородных кристаллов TGS.

1. Shi-Ning Zhu, Yong-Yuan Zhu, Nai-Ben Ming . Ferroelectric Superlattice: Materials and Applications. Review// Phase Transitions. (2000).- Vol.72.-P. 239-298.

2. Ban Z.-G., Alpay S. P., Mantese J. V. Phys. Rev. 2003. B 67. P. 184104. DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.184104>.

3. Scanning capacitance microscopy of TGS – TGS + Cr ferroelectric crystals / R. V. Gainutdinov [et al.], I. F. Kashevich [et al.] // Ferroelectrics. – 2019. – Vol. 541. – P. 39–46. Gainutdinov R.V., Belugina N.V., Lashkova A.K. et al. Ferroelectrics. 2019. V. 541. Issue 1. P. 39. <https://doi.org/10.1080/00150193.2019.1574640>

О СТРУКТУРАХ ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ ОТ РЕЗУЛЬТАНТА МНОГОЧЛЕНА С ПЕРВОЙ ПРОИЗВОДНОЙ ПРИ НАЛИЧИИ КРАТНЫХ КОРНЕЙ

*Ю.В. Трубников, М.М. Чернявский
Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова*

Теория построения явных аналитических формул для кратных корней полиномов является молодым и актуальным направлением в алгебре полиномов. До появления современных компьютеров получение точных символьных выражений значения кратного корня через коэффициенты было практически невозможным из-за большой громоздкости вычислений. Одной из первых известных опубликованных работ, в которой упоминается информация о точном методе нахождения корня кратности 2 для алгебраического полинома произвольной степени, является книга И.М. Гельфанда, М.М. Капранова и А.В. Зелевинского [1]. В той работе представлены формулы, выражающие значение кратного корня в виде отношения частных производных первого порядка от дискриминанта полинома по коэффициентам данного полинома, но явных символьных формул для нахождения кратного корня полиномов конкретных степеней не имеется. Авторам настоящего доклада удалось усовершенствовать алгоритм построения формул для кратных корней, что позволило получать нужные аналитические формулы в более компактном виде, чем, например, по теории из работы [1]. Первые результаты в этом направлении были опубликованы в статье [2]. Цель исследования – провести анализ частных производных третьего порядка от результата полинома со своей первой производной, на основе чего обосновать семейство формул, выражающих значение корня кратности 3 в виде рациональных функций от коэффициентов.