

В данной работе пьезоэлектрические свойства МКТ-ФФ исследовались одновременно интегральными и локальными методами. МКТ-ФФ с рекордными размерами: длиной до 5 мм и диаметром до 700 мкм были выращены в водно-спиртовом растворе в процессе длительной инкубации (рис.1). Такие размеры были достаточны для манипулирования и измерения интегральными методами.

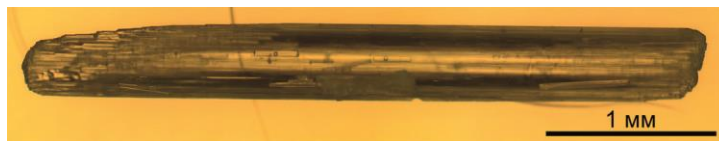


рис.1. Оптическое изображение исследованной микротрубки ФФ, выращенной в водно-спиртовом растворе.

В качестве локального метода использовалась силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика с помощью зондового микроскопа. Регистрировались локальные вертикальные и латеральные колебания поверхности МКТ-ФФ под действием приложенного напряжения между проводящим зондом (верхний электрод) и подложкой с проводящим напылением (нижний электрод). Были определены пьезоэлектрические коэффициенты $d_{15}^{local} = 60$ пК/Н и $d_{33}^{local} = 9$ пК/Н.

В качестве интегрального метода исследования диэлектрических свойств использовалась импедансная спектроскопия с помощью 4-зондового метода. По измеренным частотным зависимостям импеданса пучков МКТ-ФФ были определены два набора частот резонанс-антирезонанс. Зная значения плотности и диэлектрической проницаемости МКТ-ФФ, а также, учитывая длину образца, были вычислены $d_{15}^{int} = 50$ пК/Н и $d_{33}^{int} = 6$ пК/Н.

Значения пьезокоэффициентов МКТ-ФФ, полученные локальным и интегральным методами хорошо согласуются между собой, что позволяет использовать быстрые локальные методы для исследования пьезоэлектрических свойств микро- и нанотрубок ФФ.

Список публикаций:

- [1] Y.L. Yang, U. Khoe, X.M. Wang, A. Horii, H. Yokoi, S.G. Zhang, *Nano Today*, 4, 193 (2009).
- [2] C. A.E. Hauser and S. Zhang, *Nature*, 468, 516 (2010).
- [3] V.L. Sedman, X. Chen, S. Allen, C.J. Roberts, V.V. Korolkov, and S.J.B. Tendler, *J. Microsc.*, 249, pp. 165–172 (2013).
- [4] S. Vasilev, P. Zelenovskiy, D. Vasileva, A. Nuraeva, V.Ya. Shur, and A.L. Kholkin, *J. Phys. Chem. Solids*, 93, 68, (2016).
- [5] P. Zelenovskiy, I. Kornev, S. Vasilev, and A. Kholkin, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 18, 29681 (2016).
- [6] N. Balke, P. Maksymovych, S. Jesse, I.I. Kravchenko, Q. Li, and S.V. Kalinin, *ACS Nano*, 8, 10229 (2014).

Разработка твердотельных источников излучения в зеленом спектральном диапазоне на основе сильно легированных слоев AlGaIn:Si с содержанием алюминия выше 0.5

Осинных Игорь Васильевич

Малин Тимур Валерьевич, Журавлев Константин Сергеевич

Институт физики полупроводников СО РАН

igor-osinnykh@isp.nsc.ru

Нитриды металлов III группы и их твердые растворы являются прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны, покрывающей широкий диапазон от 0.7 эВ для InN до 6.1 эВ для AlN, что соответствует диапазону длин волн 200–1770 нм. Это делает их перспективными для изготовления светоизлучающих приборов, излучающих во всей видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Развитие технологии Al_z-нитридных полупроводников увенчалось присуждением Нобелевской премии по физике 2014 года японским ученым Исаму Акасаки, Хироси Аmano, Суджи Накамура за разработку голубых оптических диодов на основе InGaIn/GaN гетероструктур, позволивших внедрить яркие и энергосберегающие источники света, что подчеркивает важность данного материала. Дальнейшие перспективы нитридной оптоэлектроники связаны с продвижением в фиолетовую и зеленую области спектра, созданием высокоэффективных светодиодов и лазеров, источников одиночных фотонов, работающих при комнатной температуре.

Зеленый диапазон спектра до сих пор освоен лишь частично. Создание мощных эффективных и долгоживущих твердотельных источников лазерного излучения зеленого диапазона спектра, в частности, инжекционных полупроводниковых лазеров и светодиодов спектрального диапазона 520–550 нм, соответствующего максимальной чувствительности человеческого глаза, является важной задачей. В настоящее время зеленые лазерные диоды прямого излучения не распространены. Создание полупроводниковых лазеров и светодиодов зеленого диапазона длин волн, однако, наталкивается на серьезные затруднения фундаментального

характера. Для увеличения длины волны излучения лазерных InGaN/GaN-диодов нужно увеличивать содержание индия, что весьма проблематично из-за принципиальных трудностей формирования малодофектных квантовых ям. Первой проблемой являются сильные встроенные электрические поля, возникающие из-за пьезоэлектрического эффекта [1,2]. Эти поля приводят к уменьшению перекрытия волновых функций электронов и дырок в квантовых ямах, что снижает эффективность излучения. Вторая проблема состоит в том, что из-за низкой растворимости InN в GaN происходит разделение фаз InGaN, приводящее к деградации приборов [3,4]. На данный момент коммерчески доступны только зеленые лазерные диоды фирм Osram и Nichia на длинах волн 510-520 нм и КПД порядка 5-6 %.

Одним из альтернативных путей является использование оптических переходов через уровни дефектов в широкозонных материалах. Недавно была обнаружена широкополосная сверхлюминесценция в диапазоне 460 – 720 нм при возбуждении низкоэнергетическими электронными пучками, обусловленная оптическими переходами через уровни дефектов в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, сильно легированных кремнием [5]. Эти структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии из аммиака на (0001) ориентированных сапфировых подложках в лаборатории 37 ИФП СО РАН. Также было получено сверхизлучение при оптических переходах через уровни дефектов – признаками сверхизлучения были нелинейный рост интенсивности излучения при росте мощности выше порогового значения и модовая структура при воздействии возбуждающего пучка полоской. Это делает перспективным создание источников света от сине-зеленого до ближнего инфракрасного диапазона спектра (практически весь видимый диапазон) и лазеров с уникальными параметрами – с перестраиваемой длиной волны в широком диапазоне длин волн и частот (до 500 ТГц). Более того, широкий спектр излучения дефектов в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ дает основание для получения сверхбыстрых лазеров с длительностью световых импульсов порядка фемтосекунд. Были получены результаты по исследованию энергетической структуры центров, ответственных за сверхлюминесценцию в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с широкими диапазонами параметров: содержанием алюминия $x_{\text{Al}} = 0 - 1$ и концентрацией атомов кремния $5 \times 10^{19} - 2.0 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ [6, 7]. При $x > 0.46$ появлялась интенсивная широкополосная ФЛ, энергетическое положение которой менялось от 600 нм при $x_{\text{Al}} = 0.5$ до 405 нм при $x_{\text{Al}} = 1$, покрывая весь видимый диапазон. Эта люминесценция обусловлена суперпозицией донорно-акцепторного и зона-акцепторного механизмов рекомбинации. Глубина залегания акцепторной зоны составила 1.87 эВ от потолка валентной зоны для AlN и уменьшалась с уменьшением x_{Al} . Донором является кремний на месте катиона (Si_{III}). Предположительно акцептором является трехкратно заряженная катионная вакансия ($\text{V}_{\text{III}}^{3-}$), которая также отвечает за компенсацию донора Si_{III} .

Исследование спектральных и поляризационных характеристик излучения слоёв $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ и $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$ продемонстрировало расщепление широкой полосы излучения на равноудаленные друг относительно друга компоненты с приблизительно одинаковым интервалом волновых чисел, что характерно для сверхсветимости в планарном волноводе при распространении света под углом, близким к углу полного внутреннего отражения [8]. Совокупность полученных результатов свидетельствует о стимулированном характере излучения. Одним из важных моментов в создании новых лазерных источников являются исследования поведения усиления активной среды. Измеренные коэффициенты усиления на $\lambda \approx 528$ нм для $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ равны $g \approx 70 \text{ см}^{-1}$, а для $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$ на $\lambda \approx 468$ нм $g \approx 20 \text{ см}^{-1}$, полученные значения демонстрируют перспективность их использования для создания широкополосных излучателей видимого спектрального диапазона. Дальнейшими направлениями работы в этом направлении являются уменьшение оптических утечек в AlGaN гетероструктурах, создание на их основе предложенных оптических схем для практической реализации широкополосной генерации в исследуемых средах.

Исследования проводились при поддержке РФФИ (гранты № 16-32-00773 и 17-52-04112)

Список публикаций:

- [1] S. F. Chichibu, A. C. Abare, M. P. Mack, M. S. Minsky, T. Deguchi, D. Cohen, P. Kozodoy, S. B. Fleischer, S. Keller, J. S. Speck, J. E. Bowers, E. Hu, U. K. Mishra, L. A. Coldren, S. P. DenBaars, K. Wada, T. Sota, S. Nakamura, *Mater. Sci. Eng. B*, 59, 298 (1999).
- [2] Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and S. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.* 70, 981 (1997).
- [3] F. A. Ponce, S. Srinivasan, A. Bell, L. Geng, R. Liu, M. Stevens, J. Cai, H. Omiya, H. Marui, and S. Tanaka, *Phys. Status Solidi B* 240, 273 (2003).
- [4] I. H. Ho and G. B. Stringfellow, *Appl. Phys. Lett.* 69, 2701 (1996).
- [5] P. A. Bokhan, P. P. Gugin, Dm. E. Zakrevsky, K. S. Zhuravlev, T. V. Malin, I. V. Osinnykh, V. I. Solomonov, and A. V. Spirina, *J. Appl. Phys.* 116, 113103 (2014).
- [6] I. V. Osinnykh, T. V. Malin, V. F. Plyusnin, A. S. Suranov, A. M. Gilinski and K. S. Zhuravlev. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55, 05FG09 (2016).
- [7] I. V. Osinnykh, T. V. Malin, V. F. Plyusnin, K. S. Zhuravlev. B. Ya. Ber and D. Yu. Kazantsev, *J. Phys.: Conf. Ser.* (in press).
- [8] П. А. Бокхан, К. С. Журавлёв, Дм. Э. Закревский, Т. В. Малин, И. В. Осинных, Н. В. Фатеев, *Письма в ЖТФ* 43, 5 (2017).