

Влияние As на отжиг подложки (001)InP

Колосовский Данил Антонович

Дмитриев Дмитрий Владимирович, Митрофанов Иван Андреевич, Торопов Александр Иванович,
Гаврилова Татьяна Александровна

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

Журавлев Константин Сергеевич, д.ф.-м.н.

danil-ak@yandex.ru

Синтез гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) InGaAs/InAlAs/InP, согласованных по параметрам кристаллической решетки привлекает интерес исследователей из-за применимости таких ГЭС в современных полупроводниковых приборах оптоэлектроники, СВЧ-электроники и радиофотоники [1-3]. Одним из важных этапов роста ГЭС является удаление окислов с поверхности подложки (001)InP, т.к. окислы на поверхности InP (InP_xO_y) [4] могут формировать как структурные, так и электрооптические дефекты в ГЭС. Для полного удаления окисного слоя с поверхности InP используют высокотемпературный прогрев [5] при котором температуру подложки необходимо поднимать выше 480°C, что приводит к десорбции фосфора и сегрегации на поверхность атомов индия [6]. Поэтому для предотвращения разложения поверхности прогрев InP подложек осуществляется в потоке фосфора [7] или в потоке мышьяка [8]. Отжиг в потоке мышьяка является более перспективным, поскольку процесс отжига в потоке мышьяка происходит при более низкой температуре (~510°C) чем в потоке фосфора (~540°C). Более низкая температура прогрева положительно сказывается на морфологии поверхности подложки и качестве последующих эпитаксиальных слоев. Однако, несмотря на плюсы данного подхода, процесс отжига подложки (001)InP не до конца изучен. В работах [9, 10] обнаружено полное замещение фосфора мышьяком в приповерхностных слоях, в то время как в работе [8] авторы утверждают, что величина покрытия поверхности мышьяком после отжига не превышает 5%. Таким образом, целью работы является исследование влияния потока As на отжиг подложки (001)InP в сверхвысоком вакууме.

Исследования проводились на полуизолирующих *epi-ready* подложках (001)InP в установке Riber Comrast-21T оснащенной системой дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) с системой регистрации дифракционных картин kSA 400 фирмы k-Space Associates, которая обеспечила возможность изучения атомных процессов на поверхности подложки и реконструкции поверхности. В качестве источника мышьяка применялся вентильный источник модели VAC 500. Температура подложки контролировалась *in-situ* инфракрасным пирометром «Iron Modline Plus». Контроль потока As поступающего на поверхность осуществлялся с помощью ионизационной лампы «Bayard-Alpert JBA». При измерении эффективного давления в потоке лампа помещается в положение под подложкой. Параметры эффективного давления в потоке с ионизационной лампы снимаются с помощью вакуумметра «Granville-Phillips series 350».

Отжиг подложки InP осуществлялся в потоке мышьяка с эквивалентным значением давления $F_{\text{As}} = 10^{-5}$ - 10^{-6} Торр в диапазоне температур 480-560°C. На начальных этапах отжига на поверхности подложки имеется оксидная пленка, которая видна на дифракционной картине как размытый фон. При температуре подложки 350°C окисел утоняется, что проявляется в уменьшении интенсивности фона и проявляются рефлексы кристаллической структуры подложки. При дальнейшем повышении температуры происходит формирование сверхструктуры (2x3). При температуре 450°C проявляется сверхструктура (2x6) [11]. При дальнейшем повышении температуры сверхструктура (2x6) исчезает и по достижении температуры 480-500°C может формироваться сверхструктура (4x2). При этих температурах происходит удаление остаточных окислов, что проявляется в изменении отношения интенсивностей рефлексов и фона на дифракционной картине. После удаления окисла и охлаждения подложки появляется сверхструктура (2x4). Описанные сверхструктурные перестройки связаны с замещением фосфора мышьяком и образованием приповерхностного слоя InPAs. С помощью метода ДБЭО был оценен процент замещения фосфора мышьяком. При температуре 500°C процент замещения составил 13%, а при температуре 540°C процент замещения составил 41%. Наличие приповерхностного слоя InPAs подтверждают изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в режиме энергодисперсионной спектроскопии (EDS). При анализе СЭМ изображений поверхности подложки обнаружены области InAs с латеральным размером до 50нм. Постоянная кристаллической решетки InP составляет 5.869Å, тогда как InAs 6.058Å [12]. Такая существенная разница на начальных этапах роста решеточно-согласованных слоев InGaAs/InAlAs/InP приводит возникновению напряжений, релаксирующих в виде дислокаций.

Таким образом, в работе экспериментально изучен процесс отжига подложки (001)InP в потоке As. Методом ДБЭО *in-situ* оценена величина замещения фосфора мышьяком. Методом СЭМ обнаружены области поверхности подложки InP с полным замещением на InAs.

Список публикаций:

- [1] P. L. Liu, et. al., // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1999. V. 47. P. 1297.
- [2] Jesus A. del Alamo // *Nature.* 2011. V. 479. P. 317.
- [3] A. L. Chizh, et. al., // *Technical Physics Letters.* 2019. V. 45. P. 739.
- [4] G. Hollinger, et.al., // *Journal of Vacuum Science & Technology A.* 1985. V. 3. P. 2082.
- [5] J. Massies, et. al., // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 58. P. 806.
- [6] W. M. Lau, et. al., // *Applied Physics Letters.* 1988. V. 52. P. 386.
- [7] C.R. Stanley, // *IEEE.* 1992. P. 481.
- [8] G. J. Davies, et. al., // *Appl. Phys. Lett.* 1980. V. 37. P.290.
- [9] C. H. Li, et.al., // *PHYS. REV. B.* 2002. V. 65. P. 205322.
- [10] V.A. Kulbachinsky, et. al., // *Semiconductors.* 2015, V. 49. P. 204.
- [11] D. V. Dmitriev, et. al., // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019. V. 475. P.012022.
- [12] T. P. Pearsall et. al., // *Applied Physics Letters.* 1978. V. 32. P. 497.

Динамика нелинейного электрокинетического движения диэлектрических микрочастиц в нематическом жидком кристалле

Кондорова Ольга Сергеевна

Южно-Уральский государственный университет

Подгорнов Федор Валерьевич, к.ф.-м.н.

olunka2000@mail.ru

Жидкие кристаллы представляют собой уникальные анизотропные материалы, обладающие свойством текучести, упорядоченности и упругости. Благодаря комбинации этих свойств ЖК нашли широкое применение в дисплейной технике, пространственно-временных модуляторах оптического излучения, адаптивной оптике. В последнее время активно исследуется возможность их применения для трехмерной манипуляции микро и наночастицами, а также их управляемой сборки. Данное применение основано на особенностях линейных и нелинейных электрокинетических эффектов в ЖК, вызванных их свойствами, в частности с появлением топологических дефектов, индуцированных диспергированными частицами. Появление данных дефектов приводит к радикальному изменению электрокинетических эффектов (напр. электрофорез, диэлектрофорез) в жидких кристаллах.

Целью данной работы является идентификация эффектов, влияющих на нелинейное электрокинетическое движения диэлектрических микрочастиц в нематических жидких кристаллах.

Для проведения эксперимента были собраны жидкокристаллические ячейки с компланарными электродами (расстояния между электродами – 100 микрометров) и толщиной жидкокристаллического слоя равным 20 микрометрам. В данные ячейки были диспергированы диэлектрические микрочастицы с диаметрами 1, 3 и 8 микрометров. Частота приложенного знакопеременного прямоугольного напряжения была равно 10 Гц, а амплитуда изменялась в пределах 0-150 В.

Было показано, что график зависимости скорости микрочастиц от приложенного напряжения состоит из двух участков - участка с линейной зависимостью от напряжения и участка с кубической зависимостью. В тоже время скорости движения частиц зависят от размера микрочастиц. Частицы с большим диаметром движутся значительно быстрее, чем частицы с маленьким диаметром. Аппроксимация экспериментальных данных показала, что линейные и кубические подвижности микрочастиц не зависят от их размера. На первый взгляд данный вывод выглядит противоречивым. Данный результат был объяснен влиянием числа Пикле на порог перехода от линейного режима электрофоретического движения к кубическому. Для частиц с большим диаметром он наступает при меньшем приложенном напряжении, чем для частиц с маленьким диаметром. Таким образом при одинаковых линейной и кубической подвижности частицы двигаются с разными скоростями.