

Сведения о выполненных работах в 2020 году
по проекту «Комптоновская рентгеновская микроскопия
биологических объектов»,
поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 18-44-06001

Руководитель д-р физ.-мат. наук Толбанов Олег Петрович

В результате выполнения исследований на заключительном этапе проекта получены следующие результаты.

Выполнен сравнительный анализ зависимости характеристик HR GaAs:Cr материала и сенсоров от технологии роста (VGF и LEQ исходных n-GaAs кристаллов. Экспериментально показано:

- наличие крупномасштабных (до 500 мкм в диаметре) дефектов типа «bubbles» в LEC HR GaAs:Cr пластинах обусловлено их присутствием в исходном LEC n-GaAs;
- VGF n-GaAs материал характеризуется отсутствием «bubbles» по всей длине кристалла, а также более крупными ячейками (до 1-2 мм) дислокационной сетки по сравнению с LEC n-GaAs;
- постростывый отжиг пластин LEC n-GaAs существенно снижает концентрацию «bubbles» дефектов в соответствующих пластинах LEC HR GaAs:Cr, при этом величина произведения подвижности на времена жизни неравновесных электронов достигает значений 0.0001 кв.см/В;
- постростовой отжиг кристаллов VGF n-GaAs позволяет изготавливать термостабильный «bubbles free» VGF HR GaAs:Cr материал, имеющий величину произведения подвижности на времена жизни неравновесных электронов 0.00005 кв. см/В.

Таким образом, технология LEC обеспечивает изготовление HR GaAs:Cr материала и сенсоров с более высокими характеристиками, по сравнению с технологией VGF.

Сформирован технологический задел и изготовлены опытные образцы матричных HR GaAs:Cr сенсоров с шагом чувствительных элементов 20 мкм.

Выполнены исследования фазового и компонентного состава локальных неоднородностей в HR GaAs:Cr материале.

Установлено:

- в LEC HR GaAs:Cr материале, как в области «bubble» дефекта, так и в бездефектной области соотношение базовых элементов Ga и As соответствует стехиометрическому соотношению для GaAs;
- концентрация примесных атомов в LEC HR GaAs:Cr в области «bubble» дефектов существенно меньше 10^{20} см^{-3} ;

- в первом приближении «bubble» дефекты в LEC HR GaAs:Cr могут быть представлены вложенными друг в друга сферами: центральной, промежуточной и внешней при этом диаметр внешней сферы может достигать 1 мм;
- в пределах «bubble» дефекта концентрация глубоких уровней распределяется неравномерно и может иметь как максимум, так и минимум в центре «bubble» дефекта, что обусловлено различными стадиями развития подобных дефектов.

Показано, что основными факторами, приводящими к формированию локальных неоднородностей типа «bubble» в LEC n-GaAs материале являются стехиометричность компонентов во время выращивания кристалла и режим постростового отжига.

Проведены исследования глубоких уровней, содержащихся в HR GaAs:Cr материале. Сформулирован перечень доминирующих глубоких уровней в HR GaAs:Cr материале и выполнена оценка их влияния на характеристики HR GaAs:Cr материала и сенсоров. Разработана четырехуровневая модель, включающая глубокие и мелкие акцепторы и доноры, которая позволяет качественно и количественно оценивать и прогнозировать характеристики HR GaAs:Cr материала и сенсоров на его основе. Установлено, что наилучшее качественное и количественное совпадение расчетных и экспериментальных величин времени жизни неравновесных носителей заряда, холловской подвижности и удельного сопротивления HR GaAs:Cr материала достигается при использовании концентрации EL2 центров в диапазоне $(1-3) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрации Cr равной $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, концентрации термоакцепторов в диапазоне $(1-4) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Показано, что доминирующими глубокими уровнями, определяющими время жизни не равновесных электронов и дырок в LEC HR GaAs:Cr, являются ионизованные EL2+ центры и ионы Cr-, соответственно.

Установлено, что HR GaAs:Cr сенсоры характеризуются слабой температурной зависимостью эффективности сбора заряда в диапазоне температур «+» 10 С – «+» 50 С.

Выполнен анализ результатов проекта в целом. Показано, что выполненные исследования и сформированный технологический задел позволяют изготавливать HR GaAs:Cr с размерностью 1536×512 пикселей, с шагом пикселей 20 мкм, с 95 % пропусканием квантов с энергией более 15 кэВ, обеспечивающие эффективную регистрацию и формирование изображения в рентгеновском излучении с энергией 15-80 кэВ.

В ходе выполнения проекта было показано, что использование матричных HR GaAs:Cr сенсоров в качестве чувствительных элементов комптоновского рентгеновского микроскопа позволяет получать изображения биологических объектов с пространственным разрешением на уровне 100 нм при облучении 30-60 кэВ квантами и при значительно меньшей дозе по сравнению с системами в проходящем излучении.

Полученные результаты представлены на международной онлайн конференции IEEE 2020 (<https://nssmic.ieee.org/2020/>) и опубликованы в рецензируемых журналах:

Journal of Instrumentation (Q1) - 2 статьи; Физика и техника полупроводников (Q3, 2020, том 54, вып. 6) - 1 статья.

Задачи этапа и проекта в целом, находящиеся в сфере ответственности российского исполнителя, решены в полном объеме.