

**Аспирант:** Леган Дмитрий Михайлович.

**Наименование научно-квалификационной работы:** Исследование и оптимизация гетероэпитаксиальных микро- и нанослоев соединений  $A^{III}B^V$ , выращенных для высокоэффективных солнечных элементов .

**Объект исследования.** Высокоэффективные тандемные солнечные элементы (СЭ) двух типов: двухкаскадные GaAs/Si СЭ, предназначенные для наземного использования и трехкаскадные  $In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$  солнечные элементы, предназначенные для использования в космическом пространстве.

**Актуальность** данных расчетов заключается в том, что существует теоретическая возможность получения бóльшего КПД у двухкаскадных GaAs/Si СЭ, чем у стандартных кремниевых СЭ и бóльшего КПД у трехкаскадных  $In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$ , чем у трехкаскадных  $Ge/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$  солнечных элементов, которые уже традиционно используются в космическом пространстве. Кроме того, технология изготовления трехкаскадных  $In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$  солнечных элементов позволяет переносить структуру тонких эпитаксиальных слоев данных СЭ на различные подложки, в том числе и полимерные пленки, получая таким образом, легкие и гибкие солнечные элементы, что является очень важным обстоятельством для СЭ, используемых в космосе.

**Целью** работы было исследование и оптимизация структуры двухкаскадного GaAs/Si и трехкаскадного  $In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$  солнечного элемента для увеличения их КПД.

**Методы исследования.** Моделирование работы и оптимизация структуры двухкаскадного GaAs/Si и трехкаскадного  $In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$  солнечных элементов производилась в программном пакете для приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD. Для анализа кристаллического совершенства использовались данные рентгеновской дифрактометрии и фотолюминесценции. Анализ морфологии

поверхности выращенных структур производился с помощью атомно-силовой микроскопии.

**Практическая значимость исследования.** Известно, что постоянная решетки твердого раствора  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  отличается от постоянных решеток  $\text{GaAs}$  и  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$  (у последних двух они совпадают), поэтому при росте слоя  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  на  $\text{GaAs}$  в нем появляются прорастающие дислокации, которые являются активными центрами безызлучательной рекомбинации, что приводит к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда в этом слое. Предложен метод выбора оптимальной толщины основного поглощающего (базового) слоя  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  в трехкаскадном  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$  солнечном элементе в зависимости от величины времени жизни неосновных носителей заряда в этом слое. Таким образом, экспериментально измерив время жизни неосновных носителей заряда в базовом слое  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ , можно подобрать оптимальную толщину этого слоя для данной технологии выращивания солнечных элементов данного типа.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые была произведена оценка КПД двухкаскадного  $\text{GaAs}/\text{Si}$  солнечного элемента при различных плотностях прорастающих дислокаций в слое  $\text{GaAs}$  для двух- и трехконтактной схемы включения.
2. Впервые установлена теоретическая зависимость оптимальной толщины основного поглощающего (базового) слоя  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  в трехкаскадном  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$  солнечном элементе от величины времени жизни неосновных носителей заряда в этом слое для солнечного спектра AM1.5d.
3. Впервые рассчитан вклад в КПД трехкаскадного  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$  солнечного элемента от нижнего  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  каскада в зависимости от времени жизни неосновных носителей заряда в основном поглощающем (базовом) слое  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ .

#### **Основные результаты и выводы работы:**

1. Высокого КПД двухкаскадного  $\text{GaAs}/\text{Si}$  солнечного элемента можно добиться только при условии, что плотность прорастающих дислокаций в слое

GaAs не превышает порядок  $N_d=10^6 \text{ см}^{-2}$  и при использовании трехконтактной схемы включения.

2. Предельный КПД двухкаскадного Si/GaAs, рассчитанный для соответствующей конструкции и структуры 3-х контактного солнечного элемента Si/GaAs составил 30%.

3. Теоретический расчет показал, что в диапазоне времен жизни ННЗ от 17 пс до 53 нс, оптимальная толщина изменяется в пределах от 0.9 до 7.5 мкм.

5. Показано, что начиная от  $\tau = 6.7$  нс, величина оптимальной толщины базового слоя  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  более не увеличивается, оставаясь равной 7.5 мкм и при более высоких значениях времен жизни ННЗ.

6. Показано, что в зависимости от величины времени жизни ННЗ, вклад в общий КПД трехкаскадного  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$  солнечного элемента от нижнего  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  каскада составляет величину от 1 до 7 %.

7. Анализ морфологии и измерения времени жизни ННЗ в базовом слое  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  позволяет сделать вывод о том, что применение буферных слоев AlAs  $\rightarrow$   $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$  приводит к тому, что прорастающие дислокации во время роста структуры начинают скользить вдоль плоскостей скольжения, выходя, в конечном итоге, на торцы кристалла. То есть, таким образом, во время роста происходит постепенная аннигиляция прорастающих дислокаций.

#### **СПИСОК КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ:**

Тандемные солнечные элементы, GaAs/Si солнечные элементы,  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$  солнечные элементы, Sentaurus TCAD, прорастающие дислокации, оптимальная толщина, время жизни неосновных носителей заряда, численное моделирование.