Конструкция и особенности изготовления детектора одиночных фотонов на базе лавинного фотодиода InP/InGaAs/InP для квантовых коммуникаций

В.В. Преображенский, И.Б. Чистохин, М.А. Путято, Н.А. Валишева, Е.А. Емельянов, М.О. Петрушков, А.С. Плешков, И.Г. Неизвестный, И.И. Рябцев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск,

630090, Пр. Академика Лаврентьева, 13

тел: +7 (383) 333-1967, эл. почта: pvv@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/RCSP2021-16

Однофотонные лавинные фотодиоды (ОЛФД) на основе гетероструктуры InP/InGaAs/InP обеспечивают поглощение на длине волны 1.55 мкм и применяются в волоконно-оптических линиях связи для реализации систем однофотонной квантовой криптографии.

Для создания ОЛФД нами были проведены следующие работы: разработка конструкции и проектирование топологии ОЛФД на основе гетероструктуры InP/InGaAs/InP, технологического маршрута его изготовления методами планарной технологии, способа и условий проведения локальной диффузии цинка с целью получения заданного профиля распределения примеси р-типа и толщины области лавинного умножения, методов контроля параметров отдельных слоев гетероструктуры и ОЛФД в целом.

Многослойная гетероструктура в совокупности с локальной диффузией Zn, металлизацией и диэлектрическими слоями состоит из следующих частей:

1. Тыльная сторона сильно легированной подложки n^+ -InP с контактом;
2. n^+ -InP буферный слой толщиной 1 мкм и с концентрацией примеси $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$;
3. поглощающий i-слой $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 1-1,5 мкм с концентрацией примеси $< 10^{15} \text{ см}^{-3}$;
4. слой градиентного состава $i\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Al}_{1-y}$ толщиной 20-50 нм с концентрацией примеси $1\text{-}5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$;
5. n -InP слой (charge) толщиной 200 нм с концентрацией примеси $1\text{-}2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для создания перепада электрического поля;
6. i-слой InP толщиной 3,5 мкм с концентрацией примеси $< 10^{15} \text{ см}^{-3}$;
7. p^+ легированная локально область в i-слое InP диаметром 20 мкм, создаваемая диффузией Zn через окно SiO_2 . После создания легированной p^+ -области толщина области лавинного умножения составит 0,3-1,0 мкм;
8. Кольцевая металлизация Ti/Pt/Au к p^+ -области, создающая контакт.

Гетероструктуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке n^+ -InP. Основными параметрами, определяющими работоспособность ОЛФД в гейгеровском режиме как детектора одиночных фотонов являются квантовая эффективность счета (требуется 15-25%), частота темновых импульсов (требуется менее 50 кГц) и коэффициент послепульсаций менее 15%.

Для достижения предельных параметров ОЛФД, работающих в счетном режиме, требуются рекордно малые темновые токи при обратных напряжениях смещения вблизи напряжения пробоя. Для этого необходима минимизация уровня фоновых примесей в слоях гетероструктуры (п.3 и п.6 выше). Были проведены исследования влияния условий выращивания этих слоев на уровень фоновых примесей и дефектов в них с помощью сочетания методов C-V измерений ртутного зонда и МДП структуры с послойным травлением эпитаксиальных слоев. Обсуждаются результаты проведенных исследований.

Для характеристики работоспособности чипов ОЛФД в гейгеровском режиме был разработан и изготовлен временный корпус, в котором чип устанавливается на позицию измерения с применением прижимных контактов. Конструкция корпуса позволяет оперативно проводить герметизацию, охлаждение чипа до рабочей температуры (-53°C) и измерение параметров чипа (квантовой эффективности счета, частоты темновых импульсов и коэффициента послепульсаций) при засветке лазерным излучением через оптоволокно.

Достигнутые в наших образцах ОЛФД величины темнового тока при температуре 217 К вблизи напряжения пробоя (менее 10^{-11} А), коэффициент лавинного умножения (25-30) в линейном режиме и частота темнового счета (менее 50 кГц при перенапряжении до 3.5 В) в режиме Гейгера не уступают результатам мирового уровня.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).