

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 26

Мощные быстродействующие фотодетекторы

Докладчик: Е.В. Контрош

Содержание:

1.Область применения

2. Конструкции быстродействующих фотодетекторов

- 3. Фотовольтаические характеристики *p-i-n* Al_xGa_{1-x}As/GaAs фотодетекторов
- 4. Многопереходные *p-i-n* $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ фотодетекторов

5. Заключение

Область применения

Радиофотоника (СВЧ-оптоэлектроника) – это новая область науки и техники, основными предметами изучения которой являются генерация, передача и обработка СВЧ-сигналов с помощью оптических и оптоэлектронных методов

Аналоговая волоконно-оптическая линия передачи СВЧ-сигналов – одно из основных функциональных устройств радиофотоники и предназначена для использования:

- в системах радиосвязи
- в радиолокационных системах с АФАР
- в измерительной СВЧ-технике



Рис. 1 Оптоволоконный канал связи

Конструкции ФД:

- *p-i-n* обладающие широкой *i*-областью, в которой обеспечивается поглощение излучения;
- *p-i-n* с частично обедненным слоем (PDA ФД Partially Depleted Absorber ФД) (20 дБм при 50ГГц);
- униполярные *p-i-n* ФД (UTC ФД Uni-Travelling Carrier ФД) (8дБм при 300ГГц);
- *p-i-n* ФД с двойным обедненным слоем (DDR ФД Double Depletion Region ФД);
- лавинные ФД (1,6ГГц);
- ФД с барьером Шоттки, в том числе структурой металл-полупроводник-металл (25 ГГц).



Рис.2 Варианты ввода излучения в структуру: *а* – перпендикулярно слоям; *б* – под углом к слоям; *в*, *г* – с торца структуры

Фотовольтаические характеристики *p-i-n* Al_xGa_{1-x}As/GaAs фотодетекторов

Основные параметры AlGaAs/GaAs ФД:

•Низкие значения темновых токов «насыщения» соответствующих туннельно-ловушечному (A>2): <10⁻⁸A/cm², рекомбинационному (A=2): <10⁻¹⁰A/cm² и диффузионному (A=1): <10²⁰A/cm² механизмам транспорта носителей;

•Спектральный диапазон чувствительности - 800-860nm;

•Значение внешней квантовой эффективности $\geq 80\%$ (820-850nm);

•КПД преобразования высокочастотного (>1GHz) мощного (≥1,0W) модулированного оптического излучения ≥50%;

•Время срабатывания на полувысоте амплитуды <1 ns.





Рис. 3 Схема гетероструктуры однопереходного Al_xGa_{1-x}As/GaAs *p-i-n* ФД.

Рис. 4 Спектральные характеристики структуры Al_xGa_{1-x}As/GaAs *p-i-n* ФД.



Рис. 5 Темновые ВАХ 3х ФД с разными значениями предэкспоненциальных множителей - «токов насыщения» для трёх механизмов транспорта носителей: туннельно-ловушечного - J_{0t} , (A>2); рекомбинационного - J_{0r} , (A=2); диффузионного - J_{0d} , (A=1).



Рис. 6 Зависимости КПД от падающей мощности для 3х образцов ФД (№ 1, 2, 3) измеренные в фотовольтаическом режиме, при возбуждении монохроматическим излучением: кривые 1, 2, 3 - при непрерывном возбуждении ($\lambda = 830$ нм, 25⁰C); кривые 4, 5, 6 – импульсное возбуждении ($\lambda = 780$ nm).



Рис. 7 Зависимости КПД от величины J_{0d} – «токов насыщения» диффузионного механизма токопрохождения *p-i-n* перехода (трёх экспоненциальная модель) для образцов ФД № 1, 2, 3; криая 1- постоянное лазерное возбуждение, (λ=830 нм);
кривая 2 – импульсное лазерное возбуждение, (λ=780 нм).





Рис. 9 Расчёт импульсных характеристик СВЧ *p-i-n* ФД изменении Rн



Рис. 10 Фотоответ СВЧ сборки, пиковой мощностью 9Вт и длительность <0,9нс из 16 ФД при облучении лазерным импульсом с пиковой мощностью ~ 20Вт



Рис. 11 Мощный ФД созданный на основе последовательно соединённых однопереходных AlGaAs/GaAs *p-i-n* фотодетекторов с вводом излучения по оптоволокну

Рис. 8 Форма импульса напряжения на сопротивлении 3.32Ом при облучении импульсами лазерного излучения 780нм с полушириной < 200пс

Многопереходные *p-i-n* Al_xGa_{1-x}As/GaAs ФД

monochromatic radiation



Рис. 12 Схема модели монолитного трёхпереходного $Al_xGa_{1-x}As$ /GaAs ФД





Рис. 13 Расчётная схема монолитного трёхпереходного *p-i-n* Al_xGa_{1-x}As/GaAs ФД с толщинами слоёв *p-i-n* переходов и соединительными *n⁺⁺-p⁺⁺* туннельными диодами, (по оси – «х»)
расчётные значения уровней легирования 1 – верхний каскад, 2 – средний каскад, 3 – нижний каскад, 4 – туннельные переходы, (по оси – «у»)

Рис. 14 Расчётные зависимость плотности генерации электронно-дырочных пар по толщине структуры монолитного трёхпереходного *p-i-n* Al_xGa_{1-x}As/GaAs ФД.



Рис. 15 Расчётные нагрузочные характеристики кривая 1 для однопереходного (R_{опт} =2Oм, КПД=55,8%) и кривая 2 - монолитного трёхпереходного (R_{опт} =21Oм, КПД=60,2%) *p-i-n* Al_xGa_{1-x}As/GaAs ΦД, Фотоактивная поверхность 4·10⁻⁴ см² возбуждение постоянным лазерным излучением мощностью 1Вт, (λ=810нм)



Рис. 16 Расчётные характеристики мощности импульса фотоответа для сборок из 5 монолитных трёхпереходных - кривая -2 и 16 однопереходных р-i-п ФД – кривая 3, при возбуждении импульсным лазерным излучением мощностью 8 Вт, (λ=830нм), τ_{0,5} = 500 пс, Rh=50 Ом



Рис.17 *a*) – схема монолитного двухкаскадного ФД на основе GaAs; *б*)-схема двухкаскадного фотопреобразователя выполненного с использованием планарной коммутации двух *p-i-n* AlGaAs/GaAs диодов соединённых с использованием n⁺⁺-GaAs/i-GaAs/i-AlGaAs/p⁺⁺-AlGaAs туннельных диодов





Рис.18 Кривая 1 - спектральная характеристика внешней квантовой эффективности AlGaAs/GaAs *p-i-n* диодов, 2 и 3 – экспериментальные значения плотности пикового туннельного тока (*J*_{peak}) ТД, соответственно для структур *A* (Т_{эпитакс.}=500°С) и *B* (Т_{эпитакс.}=450°С)

> Рис.19 Распределения концентрации атомов от толщины структуры туннельных диодов (структура A и B), полученные с помощью вторичнойионной масс-спектрометрии: *a*) - ТД структура *A*, *б*) - структура *B*, где кривые: 1 - Ga ; 2 -Al ; 3 -Be ; 4 - Si



Рис.20 *а*) световые ВАХ: двухкаскадных $\Phi \ni \Pi(A)$ – кривые 1-4; $\Phi \ni \Pi(B)$ – кривые 5-8; однопереходные диоды – кривые 9-12; двухкаскадные $\Phi \ni \Pi$ без учета нелинейности ВАХ ТД – кривая 13; T = 103К – кривые 4,8,12; T = 213К – кривые 3,7,11; T = 253К – кривые 2,6,10; T = 298К – кривые 1,5,9; ВАХ туннельных диодов при T = 298К для структур: (A) – кривая 1' и (B) – кривая 5'; δ) зависимости FF – кривые 1,2,3 и КПД – кривые 4,5,6 от температуры ВАХ двухкаскадного $\Phi \ni \Pi(A)$ – кривые 3,6 (кривые 2,5 расчётные, без учёта нелинейности на ВАХ ТД) и двухкаскадного $\Phi \ni \Pi(B)$ – кривые 1,4.

Заключение:

• Разработаны однопереходные *p-i-n* Al_xGa_{1-x}As/GaAs ФД в спектральном диапазоне длин волн 800-860нм с КПД более 50% и быстродействием менее 200пс.

• Экспериментально показана связь между КПД *p-i-n* ФД и токов «насыщения» - *J*_{0i} механизмов токопрохождения при возбуждении монохроматическими излучениями.

• Установлено, что в однопереходных *p-i-n* ФДх при возбуждении монохроматическим излучением, на порядок большие значения токов «насыщения» - J_{0d} приводят к снижению КПД более чем на 10% в режиме постоянного возбуждения (>200Вт/см², $\lambda = 830$ нм) и на 4% в импульсном режиме возбуждения (500Вт/см², $\lambda = 780$ нм).

• Предложена расчётная модель монолитного трёхпереходного Al_xGa_{1-x}As/GaAs ФД для преобразования мощного монохроматического излучения в диапазоне длин волн 750 – 870нм.

• Разработаны и экспериментально исследованы характеристики *n*⁺⁺-GaAs/*i*-GaAs/*i*-AlGaAs/p⁺⁺-AlGaAs соединительных ТД для монолитных каскадных ФД с пиковым током до 200А/см².

• На основе структур, *p-i-n* AlGaAs/GaAs диодов и соединительных туннельных диодов n++-GaAs/i-GaAs/i-AlGaAs/p++-AlGaAs созданы планарные двухкаскадные ФД лазерного излучения.

• Экспериментально показано в широком температурном диапазоне влияние на световую ВАХ двухкаскадного ФЭП нелинейности прямой ветви ВАХ *n*⁺⁺-GaAs/*i*-GaAs/*i*-AlGaAs/*p*⁺⁺-AlGaAs туннельного диода.

• Показано, что нелинейность прямой ВАХ *n*⁺⁺-GaAs/*i*-GaAs/*i*-AlGaAs/*p*⁺⁺-AlGaAs ТД связано с наличием встроенного в структуре ТД потенциального гетеробаръера, между вырожденной *p*⁺⁺-AlGaAs областью и *p*⁺-GaAs слоем и наличием свободных энергетических состояний, в запрещённой зоне полупроводника в области объёмного заряда ТД из-за сильного перекрытия распределения легирующих примесей.

• В двухкаскадных планарных ФЭП в фотовольтаическом режиме, при преобразовании лазерного излучения плотностью мощности ~ 100Вт/см² (λ=809нм) при температуре ~ 100К, достигнуты значения КПД - 60%.