

УДК 621.384.3:681.586

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕШЁТОК

Ясюкевич М.А., Евсюк А.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Солодучин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Сверхрешётки II типа на основе гетероструктур InAs/GaSb представляют собой перспективный класс материалов для создания инфракрасных фотодетекторов со спектрально настраиваемой длиной волны отклика. Пространственное разделение электронов в слоях InAs и дырок в слоях GaSb обеспечивает подавление Оже-рекомбинации и снижение темновых токов. Разрешённые при нормальном падении оптические переходы между минизонами упрощают конструкцию матричных фотоприёмных устройств. В работе рассматриваются физические принципы работы таких датчиков: формирование минизон, механизмы подавления рекомбинации и туннелирования, транспортные свойства, роль интерфейсов и методы теоретического расчёта зонной структуры. Экспериментально подтверждено высокое структурное совершенство таких структур, обеспечивающее большой выход годных элементов при производстве матричных фотоприёмников.

Ключевые слова. Сверхрешётки II типа; InAs/GaSb; инфракрасные фотодетекторы; Оже-рекомбинация; темновой ток; минизоны; туннелирование; интерфейсы; зонная инженерия.

Введение

Обнаружение инфракрасного излучения необходимо для тепловидения, дистанционного зондирования, газового анализа и систем наведения. Традиционные детекторы имеют недостатки: HgCdTe (КРТ, кадмий-ртуть-теллур) — основной материал для ИК-детекторов токсичен, сложен в производстве и дорог; квантово-ямные структуры (QWIP) ограничены правилами отбора — поглощение возможно только для излучения с поляризацией вдоль слоёв, что требует использования дифракционных решёток для работы при нормальном падении.

Внимание привлекают сверхрешётки II типа на основе InAs/GaSb — технологичная альтернатива с высокими характеристиками. Сверхрешётка — искусственная периодическая полупроводниковая структура из чередующихся слоёв двух материалов толщиной в несколько атомных монослоёв, что создаёт дополнительный периодический потенциал и приводит к образованию минизон разрешённых энергий. Концепция предложена в 1987 г. Смитом и Мэйлхиотом, а после создания эффективных фотодиодов и матриц получила развитие.

Основная часть

Ключевой особенностью системы InAs/GaSb является тип II разорванного выравнивания зон (broken-gap alignment): дно зоны проводимости InAs лежит приблизительно на 0,15 эВ ниже потолка валентной зоны GaSb [1]. Это означает, что электроны локализованы преимущественно в слоях InAs, тогда как дырки — в слоях GaSb. Из-за такого расположения зон электроны и дырки оказываются заперты в разных слоях, а их волновые функции перекрываются преимущественно на гетерограницах, что схематически показано на рисунке 1.

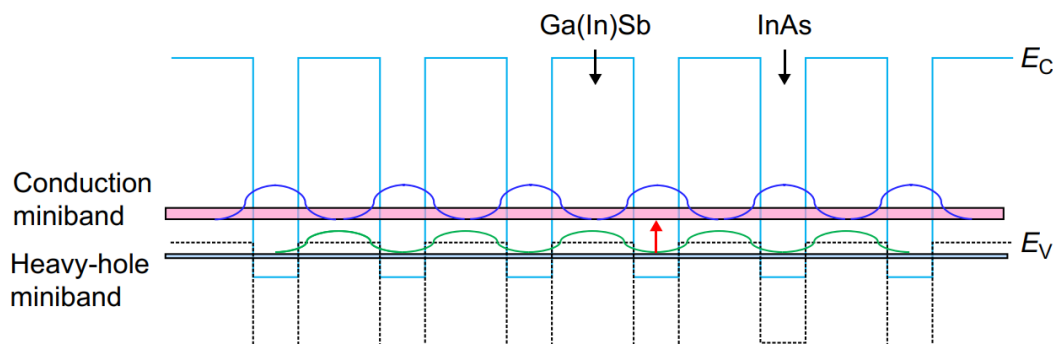


Рисунок 1 – Схема сверхрешётки InAs/GaSb с разорванным выравниванием зон II типа. Показано пространственное разделение волновых функций электронов (в InAs) и тяжёлых дырок (в GaSb). Стрелкой обозначен инфракрасный переход

В одиночной квантовой яме электроны заперты между барьерами, поэтому их энергия принимает лишь дискретные значения. В сверхрешётке же барьеры настолько тонкие, что волновые функции соседних ям перекрываются. В результате каждый дискретный уровень расщепляется в минизону — непрерывную полосу состояний, охватывающую всю структуру. Ширина минизон зависит от проницаемости барьеров. Зазор между первой электронной минизоной С1 и первой минизоной тяжёлых дырок HH1 определяет эффективную ширину запрещённой зоны. Поскольку положение минизон чувствительно к толщине слоёв, варьирование InAs и GaSb позволяет изменять ширину запрещённой зоны, а значит — настраивать длину волны детектора.

Физический принцип настройки длины волны отклика детектора основан на зависимости положения минизон С1 и HH1 от геометрических параметров структуры. В сверхрешётках II типа эффективная ширина запрещённой зоны определяется разностью энергий между первой электронной минизоной (С1) и первой минизоной тяжёлых дырок (HH1). Увеличение толщины слоёв InAs опускает край электронной минизоны С1, что приводит к сужению запрещённой зоны и, соответственно, к красному сдвигу края поглощения. Увеличение толщины GaSb оказывает более слабое влияние из-за большой эффективной массы дырок.

Экспериментальные данные последних лет демонстрируют управляемое смещение края поглощения в широких пределах. Варьирование толщины слоёв позволяет перекрывать средневолновый и длинноволновый ИК-диапазоны. В частности, изменение толщины слоёв InAs от 8 до 13,5 монослоёв и GaSb от 13 до 7 монослоёв даёт возможность смещать край поглощения от 5,6 до 9 мкм. При проектировании необходимо учитывать также влияние атомного перемешивания на интерфейсах, которое даёт дополнительный красный сдвиг $\sim 0,5$ мкм [2].

Возможность работы в длинноволновой области подтверждена в работе, где получены структуры с краем поглощения 10,5 мкм при 77 К, что полностью перекрывает дальний ИК-диапазон (8–14 мкм) [3]. Период составил 7,46 нм, а структура сохраняла монокристалличность даже при 300 периодах. Эти результаты показывают, что сверхрешётки InAs/GaSb могут эффективно работать как в средневолновом (MWIR, mid-wavelength infrared), так и в длинноволновом (LWIR, long-wavelength infrared) диапазонах.

В квантово-ямных фотодетекторах (QWIP) поглощение возможно только для света с поляризацией вдоль слоёв, поэтому при нормальном падении требуется ввод излучения через дифракционные решётки. В сверхрешётках II типа реализуется иной механизм: их запрещённая зона определяется зазором между минизонами С1 и HH1, а оптические переходы являются межзонными [4]. Для таких переходов ограничения на направление света отсутствуют, что упрощает конструкцию матричных фотоприёмников.

Одним из ключевых преимуществ сверхрешёток II типа является подавление Оже-рекомбинации — процесса, при котором энергия рекомбинации электрона и дырки передаётся третьему носителю вместо испускания фотона. Это подавление обусловлено двумя факторами. Во-первых, электроны и дырки пространственно разделены по разным слоям, что снижает вероятность их кулоновского взаимодействия. Во-вторых, в сверхрешётках возникает расщепление подзон тяжёлых (HH1) и лёгких (LH1) дырок; в LWIR-структурах оно превышает ширину запрещённой зоны, делая Оже-7 переходы энергетически запрещёнными [5]. Благодаря этому время жизни носителей в таких структурах может быть на 3–5 порядков больше, чем в детекторах на основе HgCdTe с аналогичной шириной запрещённой зоны.

Эффективное подавление Оже-рекомбинации не приводит к ожидаемо высоким временам жизни носителей: на практике они составляют ~ 100 нс для MWIR и ~ 30 – 35 нс для LWIR, тогда как в HgCdTe могут достигать 1 мкс. Такая разница указывает на доминирование другого механизма — рекомбинации Шокли-Рида-Холла (SRH) на дефектах. В пользу этого говорят температурная зависимость фотoluminesценции ($\sim 1/T^2$) и вклад токов генерации-рекомбинации в темновой ток при 80 К. Природа дефектов пока не ясна: предполагается их локализация вблизи середины запрещённой зоны или у края валентной зоны, но окончательный ответ остаётся предметом исследований [5].

Подавление межзонного туннелирования в сверхрешётках II типа обусловлено большой эффективной массой носителей: мнимый волновой вектор в запрещённой зоне возрастает с увеличением массы, что обеспечивает большую длину туннельного затухания по сравнению с объёмным HgCdTe при той же ширине запрещённой зоны. Благодаря подавлению туннелирования становится возможным использование более высокого уровня легирования, чем в детекторах на основе HgCdTe, что частично компенсирует короткое время жизни носителей, ограниченное SRH-рекомбинацией. Таким образом, анизотропия эффективных масс — не просто физическая особенность, а ключевой инженерный параметр: она одновременно обеспечивает эффективный сбор фототока вдоль слоёв и подавляет туннельные утечки в перпендикулярном направлении.

Транспортные свойства сверхрешёток II типа резко анизотропны, причём для электронов и дырок они проявляются противоположным образом. В структуре InAs/GaSb с периодом (22,6) эффективная масса электронов мала во всех направлениях ($\approx 0,022$ – $0,023m_0$), тогда как для тяжёлых дырок в направлении роста она аномально высока ($\approx 1055m_0$) из-за симметричного запрета [4]. Это означает, что дырки практически не движутся вертикально, что принципиально важно для понимания транспорта носителей в матричных фотоприёмниках: сбор фототока должен обеспечиваться преимущественно электронами, а конструкция прибора — учитывать слабую вертикальную подвижность дырок.

Особое значение анизотропия приобретает при изготовлении матричных фотоприёмников. Экспериментальное сравнение двух детекторов с одинаковым сопротивлением, но разным темновым током выявило важную закономерность. Устройство с низким темновым током демонстрировало равномерный (плоский) шумовой спектр во всём измеряемом диапазоне частот. В то же время детектор с повышенным током, вызванным утечками по боковым стенкам после формирования отдельных элементов (травления), показал наличие дополнительной составляющей шума, зависящей от частоты [4]. Это означает, что поверхностные утечки не просто увеличивают общий уровень шума, но и принципиально меняют его характер, что способно значительно ухудшить реальные характеристики прибора. Отсюда следует важный практический вывод: даже идеальный объёмный материал может быть испорчен некачественной обработкой поверхности, поэтому контроль процессов травления и пассивации критически важен для сохранения преимуществ детекторов на основе сверхрешёток.

Из-за рассогласования постоянных решёток InAs и GaSb (~0,6%) на гетерограницах возникают упругие напряжения, характер которых зависит от типа интерфейса: InSb-подобный интерфейс частично компенсирует эти напряжения, тогда как GaAs-подобный — усиливает их. При введении тонких слоёв InSb наблюдается увеличение шероховатости интерфейсов, однако, интенсивность фотолюминесценции возрастает в 1,6 раза, а перекрытие волновых функций электронов и дырок увеличивается с 56% до 58–65% за счёт атомного перемешивания [6].

Данный результат показывает, что контролируемое увеличение шероховатости само по себе не ухудшает характеристики структуры, если плотность дислокаций остаётся низкой. В таких условиях атомное перемешивание на интерфейсах выступает не как дефект, а как фактор, повышающий оптическую эффективность за счёт лучшего перекрытия волновых функций. Таким образом, управление процессами атомного перемешивания, то есть взаимного проникновения атомов на границах слоёв, может рассматриваться как дополнительный инструмент оптимизации детекторов на основе сверхрешёток InAs/GaSb.

Ключевая роль интерфейсов подтверждается и при теоретическом моделировании. Для точного предсказания ширины запрещённой зоны и оптических свойств сверхрешёток используется несколько подходов. Одним из наиболее распространённых является $k \cdot r$ -метод, основанный на приближении эффективной массы; он хорошо описывает поведение электронов и дырок в структурах с периодом, соответствующим диапазону 4–10 мкм. Для более тонких слоёв применяют атомистические методы: эмпирический метод псевдопотенциала (EPM) учитывает взаимодействие электронов с атомными остовами, а эмпирический метод сильной связи (ETBM) рассматривает перекрытие атомных орбиталей между соседними атомами. Наиболее строгими с фундаментальной точки зрения первопринципные методы, однако они сложны в расчётах и часто занижают запрещённую зону [4]. Важно, что без учёта свойств гетерограниц даже самые точные методы дают существенную погрешность: для длинноволновой сверхрешётки она может достигать 4,5 мкм [4]. Это подтверждает, что понимание процессов на границах слоёв критически важно не только для экспериментальной оптимизации, но и для корректного теоретического описания физических свойств сверхрешёточных структур.

Помимо классической системы InAs/GaSb, существуют и другие сверхрешётки II типа (например, InAs/GaInSb с повышенным поглощением или InAs/InAsSb с увеличенным временем жизни носителей), однако именно гетеропара InAs/GaSb является наиболее изученной и технологически отработанной. Сравнительная характеристика основных типов сверхрешёток II типа обобщена в таблице 1.

Сравнительная характеристика основных типов сверхрешёток II типа

Тип сверхрешётки	Преимущества	Недостатки
InAs/GaSb	Широкий диапазон настройки (2-30 мкм), хорошо изучена	Относительно низкое время жизни (30-100 нс)
InAs/GaInSb	Повышенное поглощение за счёт напряжений	Чувствительность к флуктуациям состава
InAs/InAsSb	Время жизни на порядки выше, меньше дефектов	Ниже поглощение в LWIR-диапазоне

Заключение

Сверхрешётки II типа InAs/GaSb представляют собой систему, в которой разорванное выравнивание зон порождает комплекс взаимосвязанных преимуществ: формирование минизон обеспечивает возможность спектральной перестройки края поглощения в диапазоне от 2 до 30 мкм; расщепление подзон HH1-LH1 и пространственное разделение носителей подавляют Оже-рекомбинацию на 3-5 порядков; большая эффективная масса дырок вдоль направления роста подавляет туннельные токи, позволяя использовать более высокое легирование; межзонный характер оптических переходов обеспечивает поглощение при нормальном падении, упрощая конструкцию матричных фотоприёмников. Основным ограничивающим фактором современных детекторов является рекомбинация Шокли-Рида-Холла через дефектные уровни, дающая время жизни 30-100 нс. Дальнейшее развитие технологии связано с улучшением контроля интерфейсов, где контролируемое атомное перемешивание может повышать оптическую

эффективность, увеличением времени жизни носителей и масштабированием производства на крупноформатные подложки. Уже сегодня такие детекторы позволяют создавать компактные тепловизоры для беспилотных летательных аппаратов и портативных приборов, работающих при повышенных температурах без громоздких систем охлаждения.

Список использованных источников:

1. Ting, D.Z.-Y. *Type-II Superlattice Infrared Detectors* / D.Z.-Y. Ting, C.J. Hill, A. Soibel, S.A. Keo, J.M. Mumolo, J. Nguyen, S.D. Gunapala // *Advances in Infrared Photodetectors* / ed. by S.D. Gunapala, D.R. Rhiger, C. Jagadish. – Elsevier, 2011. – P. 1-57.
2. Бакаров, А.К. *Сверхрешетки InAs/GaSb для инфракрасных фотоприемников* / А.К. Бакаров, М.А. Суханов, А.С. Ярошевич, И.Д. Лошкарев, К.С. Журавлев // *Письма в Журнал технической физики*. – 2024. – Т. 50, № 20. – С. 33-36.
3. Ерошенко, Г.Н. *Структурные и оптические свойства InAs/GaSb сверхрешеток, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии* / Г.Н. Ерошенко, В.С. Кривобок, И.И. Минаев, А.В. Клековкин, К.А. Савин, А.Е. Гончаров, А.В. Муратов, А.П. Дубовая, А.А. Пручкина, С.Н. Николаев // *Успехи прикладной физики*. – 2024. – Т. 12, № 5. – С. 64-68.
4. Fang, S. *Simulation of the Band Structure of InAs/GaSb Type II Superlattices Utilizing Multiple Energy Band Theories* / S. Fang, R. Hao, L. Zhang, J. Guo, W. Liu // *Frontiers in Physics*. – 2022. – Vol. 10, Article 822800. – P. 1-19.
5. Kovshov, V.S. *Современное состояние разработок и исследований сверхрешеток II типа для приборов ИК-фотозлектроники (обзор)* / V.S. Kovshov, A.V. Nikonov, D.A. Pashkeev, E.A. Lopatina // *Успехи прикладной физики*. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 97-111.
6. Alshahrani, D. *Effect of Interfacial Schemes on the Optical and Structural Properties of InAs/GaSb Type-II Superlattices* / D. Alshahrani, M. Kesaria, J.J. Jiménez, D. Kwan, V. Srivastava, M. Delmas, F.M. Morales, B. Liang, D. Huffaker // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2023. – Vol. 15. – P. 8624-8635.

UDC 621.384.3:681.586

PHYSICAL PRINCIPLES OF OPERATION OF INFRARED SENSORS BASED ON SUPERLATTICES

Yasyukevich M.A., Evsyuk A.V., students

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. Type II superlattices based on InAs/GaSb heterostructures represent a promising class of materials for creating infrared photodetectors with spectrally tunable response wavelengths. Spatial separation of electrons in InAs layers and holes in GaSb layers suppresses Auger recombination and reduces dark currents. Optical transitions between minibands, allowed at normal incidence, simplify the design of matrix photodetectors. This paper, based on a literature review, examines the physical principles of operation of such detectors: the formation of minibands, mechanisms for suppressing recombination and tunneling, transport properties, the role of interfaces, and methods for theoretically calculating the band structure. The high structural perfection of such structures, ensuring a high yield of suitable elements in the production of matrix photodetectors, has been experimentally confirmed.

Keywords. Type-II superlattices; InAs/GaSb; infrared photodetectors; Auger recombination; dark current; minibands; tunneling; interfaces; band engineering.