

**Отзыв официального оппонента о диссертации Г.Г. Коновалова
«Создание и исследование высокоэффективных быстродействующих
фотодиодов для средней ИК-области спектра (2-5 мкм) на основе
узкозонных гетероструктур A^3B^5 »,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук**

Актуальность. Г.Г. Коновалов – сотрудник лаборатории инфракрасной оптоэлектроники ФТИ им. А.Ф.Иоффе, а эта лаборатория – не на дотации государства, а на самоокупаемости. Изделия лаборатории пользуются устойчивым спросом в нашей стране и за рубежом, в том числе и разработанный диссертантом фотодиод (ФД) на спектральный диапазон 1.0-2.4 мкм. Работы лаборатории постоянно публикуются в отечественных и зарубежных журналах, диссертанту принадлежат 18 научных трудов. Сказанное является самым объективным свидетельством востребованности, актуальности диссертации.

Глава 1. Введение. Это фактически дайджест по физике и технике ФД. Следуя требованиям ВАК, Г.Г. Коновалов выложил в интернет диссертацию за 2 месяца до её защиты. Это очень нужная электронная публикация, полезная для студентов и аспирантов.

Глава 2 посвящена методикам измерений. Сам диссертант оценивает её скромно: она не фигурирует ни в новизне, ни в положениях, ни в общем заключении по работе, она – единственная глава без выводов. Такое отношение вроде бы понятно: методика обязана следовать ГОСТ, автор ссылается и на стандарты СЭВ, а всё это документы 1980-х годов. Но глава 2, оппонент уверен, диссертабельна. В 1980-х годах в ГОСТах компьютеры не предусматривались, а Г.Г. Коновалов все установки автоматизировал и компьютеризировал, компьютер управляет измерениями и обрабатывает их результаты. Но, безусловно, самые впечатляющие в диссертации две методики: СВЧ-измерения с помощью 25-пикосекундного лазерного импульса (**глава 3**) и прецизионное сканирование микросколов гетероструктур микрозондом (**глава 4**).

Глава 3 является центральной не только по положению (всего в диссертации 5 глав), но, по мнению оппонента, и по содержанию. Поясню эту точку зрения.

1. Цель, поставленная в начале работы, достигнута. В заглавии есть термин «высокоэффективных». Автором получен

теоретический предел: внутренняя квантовая эффективность ФД составила 95-100%. Правда, по законам оптики отражение пока 30%, но его можно устранить просветлением (просветляющими покрытиями).

2. Второй термин в заглавии – «быстродействующих». Здесь также достигнут значительный результат: освоен 10-сантиметровый СВЧ-диапазон. Г.Г. Коновалов как разработчик фотоэлектронных компонентов опередил разработчиков оптико-электронных систем; теперь за ними очередь создавать СВЧ-системы с принципиально новыми характеристиками и возможностями.

3. Изобретением является мостовая структура ФД с активной областью InGaAsSb (рис. 28). Прибор изготавливается по оригинальной микромашиной технологии, подобной, например, технологии микроболометров. Структура ФД объёмная, говоря современным языком, 3D-структура: третье измерение – не только вглубь кристалла, но и над ним, над кристаллом «подвешен» мост. Принципиально, что под контактом введены слои анодного окисла и Si_3N_4 . Всё это позволило снизить ёмкость до пикофарад и обеспечить работу в СВЧ-диапазоне.

4. И ещё одно важное обстоятельство:

На стр. 79 «Выпуск этой модели фотодиода сейчас налажен ... при ФТИ им. А.Ф. Иоффе». Как видим, разработка доведена до экспериментального мелкосерийного производства, так что результаты диссертации уже внедрены.

Глава 4. Здесь оппонент должен поспорить с самим собой: эта глава по содержанию тоже «центральная», как и третья. Впервые разработаны два гетерофотодиода: на спектральный диапазон 1-3.8 мкм (с активным слоем InAs, отличие от хорошо известных ФД на этом материале – наличие широкозонного окна InAsSbP); на спектральный диапазон 2.5-4.8 мкм (с узкозонным активным слоем InAsSb). Основное достижение – высокий уровень параметров обеспечивается при нормальной (комнатной) температуре. Так, получено сопротивление при нулевом смещении 500 Ом, и это в спектральном диапазоне 2.5-4.8 мкм! Усилия диссертанта по поиску буферных слоёв для согласования с неизопериодической подложкой InAs оказались вознаграждёнными.

Глава 5. Конечно, Г.Г. Коновалов не мог обойти в диссертации нанотехнологии, квантоворазмерные структуры. Половина главы (параграф

5.2) посвящена прибору на спектральный диапазон до 2 мкм. Ясно, что конкурировать со стандартными InGaAs ФД здесь не приходится, и Г.Г. Коновалов может основное внимание уделить фундаментальной физике. Отметим некоторые эффекты, рассмотренные в 4 и 5 главах.

1. Квантовый выход. Не путать с понятием «квантовая эффективность». Квантовый выход – это число пар носителей, генерированных при фотоактивном поглощении одного фотона. Почти всегда квантовый выход равен единице. Но возможна генерация и двух пар, если, конечно, энергия фотона в два раза и более превысит ширину запрещённой зоны. Г.Г. Коновалов справедливо объясняет этим эффектом подъём спектральной характеристики в коротковолновой области спектра (стр. 120-121).

2. Отрицательная люминесценция (стр. 129-130). Если положительная люминесценция позволяет непосредственно «видеть» области $p-n$ -перехода с инжектированными носителями, то отрицательная – с экстракцией.

3. Ударная ионизация не за счёт разогрева носителей в сильном поле, а за счёт их переходов через высокоэнергетичный барьер (стр. 142-143). Г.Г. Коновалов наблюдает оригинальную зависимость умножения от напряжения, которая показана на рис. 70. В отличие от эмпирической зависимости Миллера есть пологий участок, но он не связан с проколом, как в $n-p-i-p$ -ЛФД.

4. Следует отметить и «универсальность» прибора: при прямом смещении он является излучателем, а при обратном – ФД.

5. В структуре с глубокой квантовой ямой Г.Г.Коновалов обнаружил и экспериментально доказал существование двух электронных уровней и одного дырочного.

6. Нельзя пройти мимо фразы на стр. 125: «Наногетероструктуры ...были выращены...в лаборатории MOVPE Института физики Чешской академии наук». Это свидетельство интеграции диссертанта в мировое научное сообщество, блестящий пример сотрудничества с зарубежными исследователями и соответствия мировому уровню его работ.

Замечания по содержанию.

1. Стр. 113-121. В эксперименте со структурами с лунками сравнение $p-n$ -перехода внутри контактного кольца нецелесообразно. Сравнением фотооткликов структур без лунок (рис.

52, б) и с лунками (рис. 52, в) можно бы было с высокой точностью определить количественный выигрыш за счёт многократного отражения в последней структуре.

2. Стр. 77, 93. Здесь противоречие в приводимых значениях параметров. Если рассчитывать удельную обнаружительную способность ФД с активной областью InGaAsSb по дробовому шуму приведённого значения темнового тока, чувствительности и площадке, то получим значение $(1.4-2.4) \cdot 10^{10}$ Джонс. Диссертант же приводит значение в 4 раза больше – $9 \cdot 10^{10}$ Джонс.

3. Стр. 113. Напротив, для ФД с активным слоем InAsSb диссертант на полпорядка занижает удельную обнаружительную способность: приводит значение $(5-8) \cdot 10^8$ Джонс, в то время как расчёт по описанной выше методике даёт значение $(1.8-3.8) \cdot 10^9$ Джонс.

Замечания по оформлению.

1. Стр. 18. «...хаотический сигнал I_{noise} , связанный с флуктуацией параметров приёмника».

Здесь соединены два несовместимых параметра – шум и сигнал. Конечно, в теории обнаружения есть понятие «случайный сигнал», но это именно сигнал, но случайной длительности (формы).

2. Стр. 19. В формулах (17, 18) потерян индекс «d, dark». Незначительная описка привела к нелепице: при подстановке общего тока (16) в формулу для среднеквадратичного значения дробового шума (18) под корнем оказывается отрицательный фототок, шум может стать мнимой величиной!

В целом же диссертация оформлена хорошо, её отличают логика построения, ясный язык, она не загромождена формулами, главное в ней физика. Диссертация охватывает вопросы метрологии и технологии, проектирования и исследования полупроводниковых структур. Диссертационная работа включает все этапы – от фундаментального поиска до практического внедрения.

Заключение по работе в целом. На основании проведённого комплекса научно-практических исследований на основе двойных, тройных и четверных соединений A^3B^5 решена важная научно-практическая задача – создана гамма работающих при нормальной температуре фотодиодов для средневолновой ИК-области спектра с высокой квантовой эффективностью, близкой к теоретическому пределу, высокими быстродействием и удельной обнаружительной способностью.

Диссертация полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Профессор, доктор технических наук,
Заслуженный деятель науки РФ



М.А. Тришенков

Подпись М.А. Тришенкова удостоверяю
Профессор, доктор физико-математических наук,
Заслуженный деятель науки РФ



А.И. Дирочка