

Simple computer model of IR-photoconductor

L. I. Diakonov, E. V. Susov, G. V. Chekanova
The State United Enterprise "Alpha", Moscow, Russia

The one-dimensional model of IR-photoconductor (PC) is developed for computer simulation. PC, made from $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (CMT), consist of left, contact section, center active (IR-irradiated) section and right contact section. One can to change the length of every section, it composition, density of majority carriers in it and rate of minority carriers recombination at both contacts. The model allows to find the distribution of minority carriers on length of PC and the dependence of voltage responsivity from electric field, applied to PC.

УДК 621.383

Разработка базовой технологии изготовления фотоприемников на основе германия, легированного ртутью

В. П. Астахов, А. А. Грибанов, Н. И. Евстафьева, В. В. Карпов,
М. Е. Козырев, Н. С. Кузнецов
ОАО «Московский завод «Сапфир»», Россия

О. Г. Романов, А. Н. Чиванов
ГП ВНЦ «ГОИ им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

Выполнены исследования влияния различных факторов (способ обработки поверхности полупроводникового материала, концентрация примеси, способ изготовления электрических контактов, глубина разделительных канавок и др.) на фотоэлектрические параметры фотоприемника на основе германия, легированного ртутью. Разработаны конструкция и базовые технологические процессы изготовления вакуумных фотоприемников с охлаждаемой апертурной диафрагмой, работающих при температуре 30 К. Проведены испытания разработанных фотоприемников (ФП), состыкованных с газовой криогенной машиной.

Первые полупроводниковые приемники инфракрасного излучения (ИК) в области 8–14 мкм были примесными. К ним, в частности, относятся приемники на основе германия, легированного ртутью (Ge:Hg), которые вышли из употребления. В начале 70-х годов XX века они были вытеснены приемниками с собственной фотопроводимостью, особенно приемниками на основе теллурида кадмия и ртути (КРТ), обладающими более высокими рабочими температурами, большей обнаружительной способностью и имеющими меньшую толщину, их меньшая стоимость приемников и возможности современных газовых криогенных машин (ГКМ) охлаждать чувствительный элемент ФП до температур 30–50 К позволяют приемникам на основе Ge:Hg, учитывая почти идеальное совпадение максимума поглощения с атмосферным

окном прозрачности 8–14 мкм, составить конкуренцию приемникам с собственной фотопроводимостью.

Из всех фоточувствительных материалов на основе легированного германия наибольшее распространение получил Ge:Hg, максимум чувствительности которого находится в диапазоне 8–14 мкм. К настоящему времени хорошо известны электрофизические свойства данного материала, разработана технология выращивания монокристаллов, обладающих высокой фоточувствительностью, создана технология изготовления многоэлементных (с числом элементов до 200) и мелкоструктурных (размер приемной площадки 50×50 мкм и менее) ФП (фоторезисторов), в значительной степени решены проблемы, связанные с охлаждением ФП с помощью криогенных систем замкнутого цикла.

Поверхностная проводимость Ge:Hg при низких температурах

Основными факторами, влияющими на качество ФП из примесного германия, являются состояние поверхности полупроводникового материала, качество электрических контактов и фотоэлектрические свойства собственно материала, который может иметь разные уровни легирования и степень компенсации.

Состояние поверхности, определяемое ее обработкой (резка, шлифование, полирование), обуславливает поверхностную проводимость, являющуюся причиной избыточного шума ФП.

Исследования проводимости образцов при различных способах обработки и последующих отжигах показали, что поверхностная проводимость полностью устраняется, если вначале провести пескоструйную обработку, а затем отжиг при температуре 500 °С с последующим травлением образцов в растворе следующего состава: 10 % HNO_3 + 90 % CH_3COOH . Для устранения избыточной проводимости после обработки абразивом с размером зерна от 1 до 28 мкм оказалось достаточным стравить 0,10–0,15 мкм поверхности германия. При изготовлении фотоприемников из примесного германия этот способ оказался наиболее удобным.

Формирование омических контактов

Важный этап в создании любого полупроводникового прибора — это изготовление малошумящих омических контактов. Исследовались свойства индиевых контактов с германием, легированным ртутью, при $T = 35 \text{ K}$.

Исследования проводили на образцах с концентрацией Hg $5,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при различной обработке подконтактной области. Часть образцов после механической обработки (шлифование и пескоструйная обработка) для удаления нарушенного слоя подвергалась химическому травлению в растворе CP-4 или в кипящей перекиси водорода. Другая часть образцов после механической обработки протравливалась в холодной перекиси водорода в течение 1 мин. При этом удалялся поверхностный слой толщиной 0,03 мкм, т. е. нарушенный слой сохранялся, и скорость поверхностной рекомбинации соответствовала механически обработанной поверхности. Контакты на образцы наносились методом термического напыления индия с последующим прогревом.

Установлено, что на образцах с травленной подконтактной поверхностью напряжение шума во всем диапазоне измерений больше, чем на образцах с механической подконтактной обработкой.

Указанные особенности вольтамперных и шумовых характеристик объясняются наличием потенциального барьера для дырок на контактах.

Для определения высоты потенциального барьера была исследована спектральная зависимость фототока контакта металл — Ge:Hg. Определенные таким методом высоты барьеров In — Ge:Hg (металл—полупроводник) дают значения 0,12 и 0,05 эВ для образцов с травленной и механически обработанной подконтактной поверхностью, соответственно. При использовании в качестве контакта других металлов (Au, Ag, Cu, Te) обнаружено, что во всех случаях контакт является слабозапорным, высота барьера лежит в интервале 0,05–0,24 эВ. При этом величина напряжения контактных шумов увеличивается с ростом высоты барьера на контакте металл — Ge:Hg.

В дальнейшем при разработке многоэлементных фотоприемников был выбран контакт с высотой барьера 0,05 эВ и с минимальными контактными шумами.

Выбор оптимальной концентрации примесей

Решающее влияние на уровень фотоэлектрических параметров фоторезисторов из примесного Ge оказывают концентрации основной и компенсирующей примесей, определяющие генерационно-рекомбинационные процессы в материале.

Исследования влияния концентрации основной и компенсирующей примесей на величину удельной обнаружительной способности фоторезисторов проводились при отсутствии поверхностной проводимости и минимальной величине запорного барьера на контактах (0,05 эВ). Предполагалось, что вкладом контактных шумов и шума поверхностной проводимости в генерационно-рекомбинационный шум объема полупроводника можно пренебречь.

Полученные результаты достаточно хорошо укладываются в рамки теоретических представлений и свидетельствуют о том, что при концентрациях ртути $1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и компенсирующей примеси $(1,5\text{--}2,0) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ достигаются максимальные значения удельной обнаружительной способности. Дальнейшая разработка фоторезисторов из Ge:Hg, в том числе многоэлементных и малоразмерных, проводилась на материале с указанными значениями концентраций ртути и компенсирующей примеси.

Теоретическое исследование возможностей повышения чувствительности линейчатых ИК-приемников

Проведено исследование зависимостей чувствительности и разрешающей способности линейчатых ИК-приемников от конструктивных параметров, задающих их форму, и от оптиче-

ских свойств чувствительных элементов. Характерный фрагмент конструкции линейчатого ИК-приемника представлен на рис. 1.

Верхняя базовая поверхность 4 и нижние поверхности чувствительных элементов металлизированы и служат одновременно электродами и зеркалами. Все торцевые поверхности 1, 2 и все боковые поверхности 3, 5 чувствительных элементов считаются абсолютно гладкими. Римскими цифрами помечены объемы, в пределах которых рассматриваются распространение и поглощение излучения. Область соединительного базового перешейка разделена условной границей на две равные части II и III.

Полагая, что токи, снимаемые с нижних электродов 6, пропорциональны поглощенным в соответствующих элементах ИК-приемника энергиям излучения, будем в дальнейшем характеризовать его чувствительность отношением энергии, поглощенной в объеме освещаемого через окно на поверхности 4 одного чувствительного элемента, к энергии, упавшей на это окно. Примем также, что эти элементы с объемами I и IV ограничены с боков плоскостями 3 и 5.

Основная доля вошедшего через окно освещаемого элемента I излучения испытывает полное внутреннее отражение на поверхности 1 скошенного торца чувствительного элемента и идет под малыми углами к его оси. Некоторая доля вошедшего излучения проникает в соседний элемент IV и частично поглощается в нем, создавая паразитный сигнал в этом элементе.

Уровень паразитной связи, снижающей разрешающую способность линейчатого ИК-приемника, характеризуется отношением энергии, поглощенной в неосвещенном элементе IV, к энергии, поглощенной в освещенном элементе I.

Характерные поперечные размеры линейчатого ИК-приемника ненамного превышают длину волны регистрируемого излучения, и поэтому могли бы быть вполне заметными дифракционные явления. Однако благодаря тому, что регистрируемое излучение имеет тепловую природу и, соответственно, весьма широкий спектр, все интерференционные и дифракционные эффекты будут в значительной степени усредняться. Поэтому при количественном исследовании зависимостей чувствительности и уровня паразитной связи линейчатого ИК-приемника можно применять методы геометрической оптики.

В математическую модель работы линейчатого ИК-приемника входят задание падающего пучка, формы и оптических свойств линейчатого ИК-приемника, описание распространения и поглощения принимаемого излучения и регистрация суммарных энергий излучения, проходящих или поглощаемых в характерных областях ИК-приемника.

Для данной модели были выполнены расчеты по оригинальной программе.

Во всех сериях расчетов неизменными были следующие параметры: геометрические линейные, геометрические угловые, оптические.

Проведены четыре серии расчетов, результаты которых сводятся к следующему.

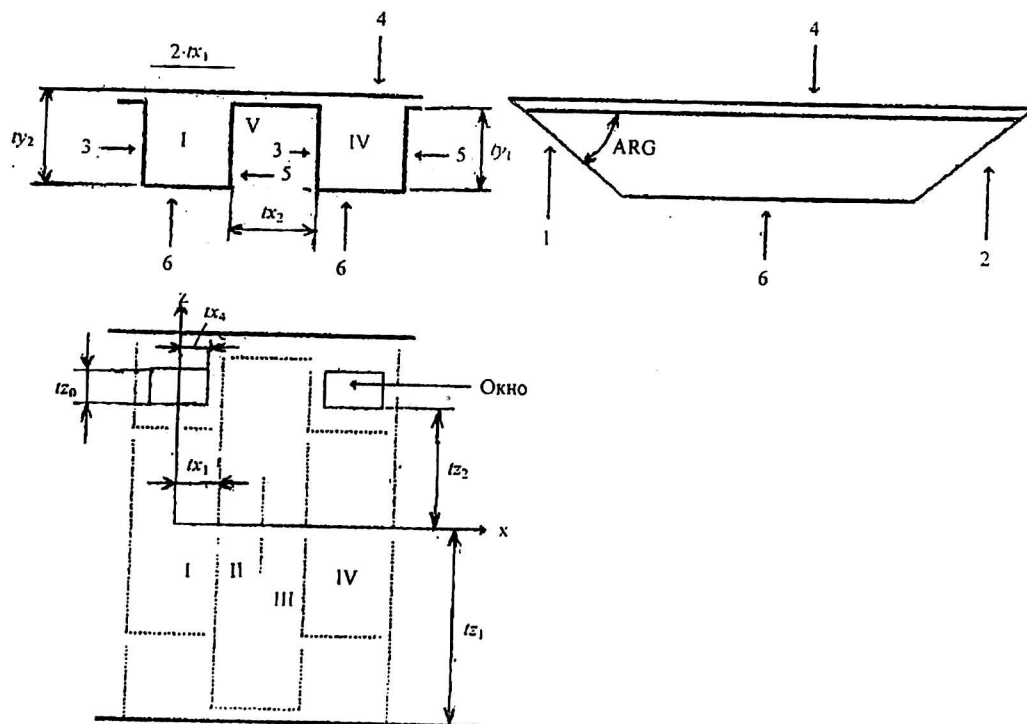


Рис. 1. Фрагмент конструкции линейчатого ИК-приемника

1. Максимальная чувствительность достигается, когда вертикальная проекция окна почти целиком попадает на скошенный торец и всего на 1 мкм заходит на нижнюю металлизированную поверхность 6 чувствительного элемента. При продольном сдвиге окна к ребру острого угла на краю элемента чувствительность снижается из-за повышения ухода излучения через границу со связующим базовым перешейком, а также из-за укорочения пути большинства лучей до первого отражения на металлизированных поверхностях, где имеют место бесполезные потери принимаемого излучения. В соответствии с ростом ухода излучения через границу перешейка при таких сдвигах растет и уровень паразитной связи.

При продольных сдвигах окна к середине элемента чувствительность его снижается, главным образом из-за увеличения доли излучения, выходящего обратно через окно после падения прямо на нижнюю металлизированную поверхность 6. Паразитная связь при малом сдвиге на 1 мкм от оптимума немного возрастает, а затем с ростом сдвига уменьшается.

2. С ростом глубины разделительной канавки растет чувствительность и ослабевает паразитная связь. В рассмотренном диапазоне довольно больших значений ширины чувствительность практически не зависит от ширины канавки, а паразитная связь быстро ослабевает с ростом ширины.

3. С повышением коэффициента отражения зеркал растут как чувствительность, так и уровень паразитной связи.

4. Была рассмотрена одна из предполагаемых причин снижения коэффициента отражения: наличие некоторой размытости границы между полупроводящей средой и напыленным на нее металлическим покрытием. Показано, что коэффициент отражения практически постоянен и равен 0,99269 при изменениях толщины переходного слоя от 0,1 до 0,6 мкм.

Конструкция блока фоточувствительных элементов

Анализ существующих конструкций фотоприемников позволил сформулировать требования к конфигурации блока фоточувствительных элементов (ФЧЭ). При этом должны быть обеспечены расположение линии приемных площадок в центре охлаждаемой подложки, удобство электрической разводки элементов, простота крепления блока ФЧЭ при минимальном тепловом сопротивлении между охлаждаемой подложкой и ФЧЭ, экранировка зазоров между элементами. Этим требованиям отвечает предложенная В. Н. Земсковым модульная конструкция блока ФЧЭ в форме усеченных прямоугольных параллелепипедов (рис. 2). ФЧЭ такой формы имеют плоские непрозрачные электрические контакты на двух противоположных гранях кристалла. Приемные площадки на верхней грани кристал-

ла выделяются в слое металлизации методом фотолитографии. Другой контакт, находящийся на противоположной грани от приемной площадки, используется для напайки ФЧЭ на электродный растр. Непосредственно под приемными площадками располагается косой срез кристалла, который обеспечивает отражение проходящего через приемную площадку излучения, направляя его в ФЧЭ. Угол среза определяется коэффициентом преломления материала и должен быть больше угла полного внутреннего отражения на границе Ge—вакуум, что гарантирует отражение внутрь кристалла. Шероховатость поверхности среза определяется длиной волны детектируемого излучения и выбирается таким образом, чтобы свести к минимуму рассеяние излучения при отражении (от поверхности полного внутреннего отражения). Линейка фоторезисторов из германия, легированного ртутью, объединенная в единый блок с кристаллодержателем, являющимся общим электрическим контактом, изготовлялась с помощью струнной резки с мелкозернистым абразивом. Размер индивидуальных контактов фоторезисторов блока и зазор между ними определяются требованиями к расположению приемных площадок и их размерам.

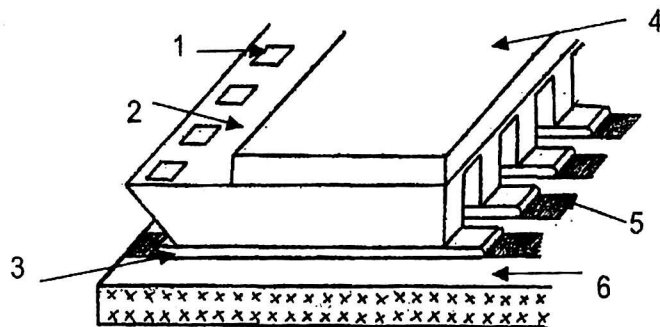


Рис. 2. Блок фоточувствительных элементов:

- 1 — приемные площадки; 2 — металлизация; 3 — припой;
4 — кристаллодержатель; 5 — электродная дорожка;
6 — лейкосапфировая пластина

Растр электрической разводки изготавливается фотолитографическим методом на лейкосапфировом диске и имеет две зоны, топология которых определяется их назначением. Зона напайки имеет набор покрытых припоем параллельных электродных полос, расположенных в соответствии с шагом индивидуальных электрических контактов фоторезисторов блока. Из этой зоны электродные полосы переходят в зону электрической разводки, увеличиваясь по своей ширине к периферии диска. Это дает возможность осуществлять дальнейшую электрическую разводку общедоступными методами монтажа без воздействия на чувствительные элементы блока. Напайка блока ФЧЭ на растр электрической разводки осуществляется при совмещении индивидуальных контактов фоторезисторов и электродных полос растра кратковременным прогревом лейкосапфировой пластины растра.

Влияние "охлаждаемого" светофильтра на фотоэлектрические параметры ФП

Теоретически известно, что влияние холодного светофильтра сказывается в уменьшении обнаружительной способности по черному телу и в увеличении этой способности в максимуме спектральной чувствительности.

Экспериментально влияние холодного светофильтра проверялось в конструкции разработанного ФП, при этом светофильтр закрепляли на апертурной диафрагме.

Результаты измерения параметров ФП (до установки светофильтра и после) показали, что средняя величина обнаружительной способности в максимуме спектральной чувствительности при установке светофильтра возрастает на ~30 %. При этом сопротивление ФЧЭ возрастает в ~2 раза, а напряжение сигнала уменьшается также в ~2 раза, что соответствует теоретическим представлениям.

Конструкция и сборка фотоприемника

За последние годы разработан ряд ГKM, которые могут использоваться для охлаждения ФП до 30 К. Принцип действия этих машин основан на адиабатическом расширении газа по циклам Стирлинга и Мак-Магона. Объединение ГKM, ФП и блока предварительных усилителей в одном модуле единой конструкции придает качественно новые свойства ФП и превращает его в ФПУ, которое может являться модулем при конструировании оптико-электронной аппаратуры. По сравнению с другими системами криогенного охлаждения ГKM более экономичны, имеют меньшие габаритные размеры и массу. Однако работа ФП, сопряженного с ГKM, осложняется из-за возникновения в электронном тракте ряда помех, вносимых работающей машиной. Проведенный анализ спектра шума фотоприемников, охлаждаемых ГKM, показал, что при работающей машине уровень шума возрастает приблизительно на порядок величины уровня шума при охлаждении жидким криоагентом. При этом в спектре шумов имеет место ряд всплесков, соответствующих гармоникам частот движущихся частей ГKM и резонансным частотам элементов конструкции.

Одной из причин, вызывающих увеличение напряжения шумов, может быть также колебание ФЧЭ относительно входного окна. Вследствие этого фоновый поток, падающий на приемную площадку, модулируется и вызывает дополнительные шумы на входе предусилителя. Другой причиной возрастания шумов являются колебания монтажных проводов относительно друг друга и корпуса ФП. На основании данных о спектре шумов и расчета вибраций элементов ГKM нами была создана виброустойчивая кон-

струкция корпуса ФПУ на основе двухстенного криостата с вакуумированным внутренним объемом, обеспечивающая охлаждение блока ФЧЭ, закрепленного на гильзе ГKM через демпфирующее устройство, до температуры 25—38 К. Этот вариант конструкции позволяет создавать ФП с минимальной величиной теплопритоков, поскольку используется интегральная стыковка, и держателем ФП является гильза газовой криогенной машины.

Охлаждаемая апертурная диафрагма с закрепленным на ней германиевым фильтром крепится к наконечнику держателя с "отрезающим" покрытием (светофильтр). Герметизация объема ФП обеспечивается корпусом, который представляет собой конструкцию, состоящую из нескольких частей, включающую в себя также цоколь с гермовыводами. Корпус снабжен входным германиевым окном.

Для криостатирования ФП использовалась разработанная в НТК "Криогенная техника" (г. Омск) микрокриогенная система МСМГ-8Б-0,4/30, работающая по обратному циклу Стирлинга.

На основании изложенных в настоящей работе теоретических и экспериментальных исследований созданы технологические процессы изготовления ФЧЭ из Ge:Hg с размером площадок от (100×100) мкм² до (35×35) мкм² и числом элементов: в однорядной линейке до 200, при шахматном расположении — до 2×48. Тщательная отработка технологических процессов позволяет использовать их в качестве базовых для изготовления фоточувствительных линеек с числом элементов до 200 и размером площадок до (35×35) мкм².

Разработанная конструкция ФП является базовой для класса многоэлементных приемников, имеющих температуру криостатирования на уровне 30 К. Технологические процессы изготовления деталей, узлов криостатов и сборки ФП, используемые в течение ряда лет для выпуска ФП на температуру криостатирования 77 К, усовершенствованы и доведены до уровня базовых для класса глубокоохлаждаемых (30 К) ФП.

С использованием полученных результатов были изготовлены четыре ФП с линейками 2×32 и 2×48 и размерами площадок (35×35) мкм². Измерение параметров ФП, состыкованных с МКС, производилось на универсальной измерительной установке К54.410 с доработанным измерительным трактом. Измерения проводили в соответствии с ГОСТ 17772—88.

В нормальных условиях удельная обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности $\lambda_{\max} = (11 \pm 1)$ мкм составила более $8 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ при вольтовой чувствительности более $4 \cdot 10^7$ В/Вт и апертурном угле (2 θ) 25°.

Комплексные испытания (проверка длины волны максимальной чувствительности, коэффициента фотоэлектрической связи, постоянной времени, плоского угла зрения, теплопритоков, стойкости к воздействию внешних факторов и минимальной наработки) показали соответствие разработанных ФП группам 5В и 6В по ГОСТ 20.39.404.

Выводы

1. Для ИК-фотоприемника на основе фоторезисторов из Ge:Hg с топологией линейки разработаны конструкция и способы обработки поверхности и металлизации токовых контактов, обеспечивающие увеличение чувствительности за счет повышения коэффициента поглощения.

2. Разработана базовая технология производства ФЧЭ из Ge:Hg с числом фоточувствительных площадок 2×32, 2×48, 100, 200 и размерами площадок от (100×100) до (35×35) мкм².

3. Разработана конструкция охлаждаемого светофильтра на область 7,9—12,4 мкм (по уров-

ню 0,1), обеспечивающего увеличение удельной обнаружительной способности в максимуме спектральной чувствительности на 30 %.

4. Разработаны конструкция и базовые технологические процессы изготовления вакуумных многовыводных криостатов ФП с охлаждаемой апертурной диафрагмой, работающих при температурах 30 К.

5. Изготовлены с использованием разработанной базовой технологии образцы фотоприемников с числом ФЧЭ 2×32 и 2×48 и размерами площадок (35×35) мкм². Фотоприемники предназначены для работы совместно с ГКМ МСМГ-8Б-0,4/30 в модульных тепловизорах класса А1 и А2 и соответствуют группам 5В и 6В по ГОСТ 20.39.404.

6. В нормальных условиях удельная обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности $\lambda_{\max} = (11 \pm 1)$ мкм составила более $8 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ при вольтовой чувствительности более $4 \cdot 10^7$ В/Вт и апертурном угле (2β) 25°.

Development of a basic process for making the photoreceivers on the mercury-doped germanium base

V. P. Astakhov, A. A. Gribanov, N. L. Eustafieva, V. V. Karpov,
M. E. Kozyrev, N. S. Kuznetsov

Open joint-stock company «MZ "Sapphire"», Moscow, Russia

O. G. Romanov, A. N. Chivanov
"GOI it. S. I. Vavilov", S.-Petersburg, Russia

The studies of influencing of the different factors (method of surfacing of a semiconducting material, concentration of an impurity, method of fabrication of electrical links, depth of separating grooves etc.) on photoelectric arguments of a photoreceiver are executed on the basis of germanium, alloy by mercury. Are designed a construction and baseline manufacturing processes of manufacture of vacuum photoreceivers with a chilled aperture diaphragm working at the temperature of 30 K. The trials of designed photoreceivers docked to the gaseous cryogenic machine are held.