

Твердотельная фотоэлектроника: сегодня и завтра

Тришенков М. А., Таубкин И. И., Филачев А. М.

Часть вторая

Обзор посвящён анализу современного состояния и перспективам развития твердотельной фотоэлектроники. В первой части, опубликованной в юбилейном номере журнала "Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы" (2008 г., № 2), было рассмотрено значение фотоэлектроники в нашей жизни, а также описано состояние разработок фотоприёмников (ФП) ультрафиолетового диапазона спектра. Вторая часть обзора посвящена самым массовым - кремниевым фотоприёмникам, в том числе матрицам, а также фотоприёмникам на основе $InGaAs/InP$ гетероструктур и германия. Приведена краткая информация о матрицах на основе широкозонного $CdHgTe$ как альтернативы $InGaAs/InP$ -матрицам. Названные фотоприёмники предназначены для приёма оптического излучения спектрального диапазона 0,38-0,2 мкм.

3. Фотоприёмники на диапазон спектра 0,38-2 мкм

Этот диапазон включает видимую область оптического спектра 0,38-0,72 мкм и "примкнувший" к этой области ближний ИК-диапазон 0,72-2 мкм (в литературе для ближнего ИК-излучения принята правая граница 1,1 мкм, здесь удобно расширить рассмотрение до ~ 2 мкм). Такая классификация ФП условна, но в ней есть своя логика. Эти ФП в подавляющем большинстве случаев неохлаждаемые, на спектральную область 0,38-2 мкм приходится основная часть излучения естественных источников на Земле - Солнца, дневного и ночного неба, а также излучение наиболее распространённых лазеров (GRB, 0,78-0,93; 1,06; 1,3-1,55 мкм).

3.1. Кремниевые фотодиоды. Хотя первый транзистор в микроэлектронике, первый фотодиод в фотоэлектронике были изготовлены на германии, но основным материалом микроэлектроники и первопроходцем новых направлений фотоэлектроники суждено было стать кремнию. Для области спектра до 1,1 мкм он вообще остается вне конкуренции. За шесть десятилетий своей жизни кремниевые фотодиоды достигли совершенства, их параметры близки к теоретическому пределу. Так, изготовлены образцы фактически с единичным квантовым выходом. Лучшей рекламой таких Si-ФД стало создание на их основе метрологических приборов для определения мощности монохроматических излучателей. Обычно лазер (светодиод) с известной мощностью используется для измерения монохроматической чувствительности S_λ фотоприёмников. Здесь все наоборот: идеальность специальных кремниевых ФД позволяет принять их чувствительность S_λ равной теоретическому значению и измерить неизвестную мощность лазера с помощью таких ФД.

В Si-ФД реализованы чрезвычайно низкие плотности темнового тока ($\sim 10^{-12}$ - 10^{-11} А/мм²), с высокоомными предусилителями достигнуты значения пороговой чувствительности вплоть до 10^{-15} - 10^{-14} Вт/Гц^{1/2}. Поражает разнообразие типов Si-ФД. Иллюстрируя это разнообразие, достаточно будет обращаться к каталогам двух ведущих в этой области фирм - Hamamatsu [1] и Perkin Elmer [2]. Так, каталог только

одной фирмы Hamamatsu включает более ста разновидностей Si-ФД. Они классифицируются прежде всего по структуре - это "обычные" ФД с *pn*-структурой, это ФД с *pin*-структурой. Такие ФД с *pin*-структурой дополнительно содержат высокоомную *i*-область, которая приводит к уменьшению ёмкости и повышению чувствительности при глубоко проникающем излучении. Поэтому Si *pin*-ФД прежде всего предназначены для регистрации коротких лазерных импульсов.

Каталог фирмы Hamamatsu предлагает Si-ФД с *pn*-структурой на любой вкус: с разными размерами площадок (от 1x1 мм² до 10x10 мм²), в разном конструктивном исполнении, малоэлементные с разной конфигурацией и расположением площадок, с термоэлектрическим охлаждением, селективные с узкими спектральными характеристиками. Только низкошумящих ФПУ с Si-ФД предлагается пять разновидностей.

Разработка Si-ФД с *pin*-структурой началась в 1970-х годах прежде всего в обеспечение опико-электронных систем наведения, обнаружения, оптических дальномеров на основе лазера с $\lambda = 1,06$ мкм. И сегодня эти фотоприёмники весьма популярны, что, в частности, подтверждает всё тот же каталог фирмы Hamamatsu: номенклатура кремниевых *pin*-ФД здесь не менее разнообразна, чем *pn*-ФД. Диаметр (сторона квадрата) фоточувствительной площадки варьируется от 0,4 до 28 мм (как видим, варьируется даже в более широких пределах, чем в Si-ФД с *pn*-структурой). Различны конструкция, форма и число площадок *pn*-ФД и *pin*-ФД. Так, наряду с одноэлементными предлагаются квадрантные (четырёхэлементные) ФД: с их помощью можно не только обнаруживать, но и определять координату оптического пятна (его отклонение от центра).

В каталоге фирмы Perkin Elmer Si *pin*-ФД полностью вытеснили Si *pn*-ФД. Здесь предлагаются *pin*-ФД на широкий спектральный диапазон от ультрафиолета (от 0,2 мкм) до 1,1 мкм и даже до 1,7 мкм (последний диапазон обеспечивается в сэндвиче Si *pin*-ФД плюс ФД на основе InGaAs). Гарантируется высокая монохроматическая чувствительность S :

$S(\lambda = 0,25 \text{ мкм}) = 0,12 \text{ А/Вт}$; $S(\lambda = 0,9 \text{ мкм}) = 0,6 \text{ А/Вт}$; $S(\lambda = 1,06 \text{ мкм}) = 0,4 \text{ А/Вт}$.

Также очень высок уровень и других важнейших параметров: для специальных низкошумящих *pin*-ФД гарантируется пороговая чувствительность не более $5 \cdot 10^{-15} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$, а быстродействующие *pin*-ФД типа С30735 имеют постоянную времени не более 0,3 нс.

Кремниевые лавинные фотодиоды. «Венцом фотодиодостроения» является, конечно, лавинный фотодиод (ЛФД). Как следует из названия, в лавинных фотодиодах развивается лавинное размножение носителей. Визитная карточка ЛФД - его коэффициент умножения M . Благодаря усилению в M раз за счёт лавинного размножения смесь сигнала с шумом «вытаскивается» из шумов предусилителя. В этом случае говорят, что шумы предусилителя подавляются. В гипотетическом нешумящем ЛФД можно было бы установить столь большое умножение M , что шумы предусилителя подавились бы полностью (и ими можно было пренебречь по сравнению с усиленным шумом ЛФД). Но в реальных Si-ЛФД умножение случайно, оно вносит свой шум. Оптимальным оказывается такое значение коэффициента умножения $M_{\text{опт}}$, при котором шумы ЛФД и предусилителя примерно равны. Поэтому оба указанных шума вносят примерно

равный вклад в общий шум. Эти шумы складываются геометрически, так что среднеквадратичное значение общего шума увеличивается в $\sqrt{2}$ раз. Так как фотосигнал увеличивается в $M_{\text{опт}}$ раз, а шум в $\sqrt{2}$ раз, то выигрыш в их отношении и в пороге чувствительности оказывается в этом случае порядка $M_{\text{опт}}/\sqrt{2}$ раз.

Уникальные свойства кремния позволили ему стать основным материалом микроэлектроники. И в фотоэлектронике при выборе материала для ЛФД кремний вновь проявляет свои уникальные свойства: лавина в нем инициируется в основном одним типом носителей - электронами. В этом случае шумы самой лавины минимальны, ведь умножение второго типа носителя будет вносить хаос и дополнительный шум. А вследствие малости шумов умножения в Si-ЛФД они сравниваются с шумом предусилителя при больших значениях M , достигаются большие значения оптимального $M_{\text{опт}}$, большой выигрыш $M_{\text{опт}}/\sqrt{2}$ в пороговой чувствительности. Особенно актуальны ЛФД для приёма коротких лазерных импульсов. В этом случае требуется широкая полоса частот предусилителя, а в широкой полосе набираются большие шумы этого предусилителя, подавить которые можно лишь за счёт лавинного усиления.

ЛФД могут иметь pn -структуру. Но в ЛФД в отличие от “обычных” ФД переход делают мелким, чтобы область пространственного заряда (ОПЗ) была узкой. Это приводит к повышению напряжённости поля в ОПЗ, лавинное размножение достигается при меньших напряжениях, чем в глубоких pn -переходах. Структура pn -ЛФД отличается от структуры “обычных” pn -ФД и наличием дополнительного охранного кольца: оно “охраняет” периметр от преждевременных локальных краевых пробоев. Ведь при мелком pn -переходе его край особенно острый, радиус мал, так что напряжённость поля в ОПЗ периметра больше, чем в ОПЗ центральной области. Поэтому при подаче напряжения пробой наступает раньше на краях (на периметре) pn -перехода, а не в его центре. Pn -переход охранного кольца формируют более глубоким (более растянутым), чем pn -переход “главной” центральной области ЛФД. Поэтому ОПЗ в pn -переходе кольца расширяется, а, значит, напряжённость поля снижается. К снижению напряжённости приводит и увеличение радиуса глубокого pn -перехода кольца. Тем самым краевые пробой устраняются.

ЛФД могут как и pin -ФД иметь высокоомный i -слой. Такой прогрессивной структурой является $pnin$ -структура, в которой i -область поглощения излучения пространственно отделена от ОПЗ на границе pn -областей. В этой ОПЗ поле максимально и происходит лавинное размножение. Такой прибор также называют “ЛФД с разделёнными областями поглощения и умножения”. ЛФД как и pin -ФД предназначены прежде всего для регистрации коротких лазерных импульсов.

Из большого числа серий ЛФД, которые предлагает Perkin Elmer, здесь назовём четыре серии. Первая серия оптимизирована к длине волны 0,9 мкм. Диаметр (сторона) площадки ЛФД этой серии лежит в пределах от 0,5 мм до 10 мм. Для ЛФД больших площадок приводятся значения $M \approx 30$, а для ЛФД малых площадок – значения $M \approx 200$. И благодаря такому умножению в 30-200 раз удаётся обнаружить оптический сигнал меньшей мощности – меньшей в $\sim M/\sqrt{2} \sim 20-150$ раз соответственно! А ведь обнаружение предельно слабых сигналов – это одна из центральных задач фотоэлектроники. Чрезвычайно мала инерционность: при больших площадках постоянная времени составляет всего 5 нс. А при малых площадках ЛФД вообще становится

субнаносекундным: его постоянная времени снижается даже до 0,5 нс.

ЛФД второй серии оптимизированы к длине волны 1,06 мкм. Диаметр (сторона) площадки варьируется в пределах 0,8-5 мм, коэффициент умножения – в пределах 35-100, постоянная времени – в пределах 2-5 нс. Как видим, параметры этих ЛФД несколько скромнее параметров ЛФД предыдущей серии для 0,9 мкм. И неудивительно: излучение с длиной волны 1,06 мкм приходится на край области собственного поглощения Si, оно слабо поглощается, что приводит к определённым проблемам при проектировании ЛФД.

Третья серия, которая представляется показательной, включает малоэлементные ЛФД: четырёхэлементные квадрантные и линейки с числом элементов 25-32. ЛФД оптимизированы к длинам волн 0,83-0,9. Несмотря на сложную конфигурацию и большое число площадок, гарантируются высокие значения коэффициента умножения ~ 50-100 раз.

Кремниевые ЛФД для счёта фотонов. И, наконец, особо следует представить серию ЛФД, работающих в режиме счёта фотонов. По аналогии со счётчиком Гейгера в литературе модно также называть такой режим работы ЛФД «режимом Гейгера». Среди первых исследователей счётного режима ЛФД были учёные фирмы RCA, которая волилась в фирму Perkin Elmer.

Для работы в счётном режиме надо изготовить и отобрать самые совершенные ЛФД: пробой должен быть однороден (без локальных микроплазм) при очень высоких напряжениях (выше пробивных). При этом темп генерации должен быть предельно малым. Вот как достигается режим счёта фотонов.

1. ЛФД охлаждается обычно до температур 0-минус 20°C. Это приводит к предельно низкому темновому току. А это крайне необходимо, так как ЛФД будут одинаково считать электроны как фототока, так и темнового тока. Вот достижения фирмы Perkin Elmer, приведённые в каталоге для темпа темновой генерации N_T (при охлаждении до температуры минус 20°C):

$N_T \leq 50-500$ пар носителей в секунду (при малом диаметре площадки 0,18 мм);

$N_T \leq 250-2000$ пар носителей в секунду (при относительно большом диаметре площадки 0,475 мм).

2. Если пересчитать темп темновой генерации N_T лучших образцов в привычный темновой ток $I_T = qN_T$, то получим ~ 0,8-4·10⁻¹⁷А и плотность ~ 2·10⁻¹⁶ А/мм². Таких исчезающе малых значений не только достичь, но даже измерить их – это уже серьёзный успех. Рассчитанная плотность тока относится не к полному темновому току, а только к умножаемой составляющей этого тока. В полный темновой ток дают вклад поверхностные утечки, в общем случае - туннельные токи и другие составляющие. «Нечувствительность» к этим составляющим – ещё одно важное преимущество лавины.

3. На ЛФД подают напряжение U_p выше пробивного U_{np} . Тогда теоретически коэффициент умножения бесконечен: при генерации электрона он инициирует лавину, и ток лавины стремится во времени к бесконечности. В реальности «бесконечностей» не бывает, ток ограничен некоторой величиной I_{max} .

4. ЛФД включают в схему с обратной связью. В такой схеме ток I_{max} сбрасывает напряжение на ЛФД ниже пробивного, поэтому лавина гасится. Простейшей схемой гашения является обычное сопротивление R , включённое последовательно с ЛФД. На

этом сопротивлении и происходит падение напряжения $I_{\max} R$.

Для чего нужен счётный режим? Выше отмечалось, что в Si-ЛФД в линейном (допробойном) режиме приходится учитывать шумы лавины, что при оптимальном умножении шумы собственно ЛФД и усилителя примерно равны, что по этой причине шум усилителя подавляется все-таки не полностью. А в счётном режиме можно полностью подавить шумы предусилителя, для этого он и нужен. Ведь в этом режиме совершенно иной принцип регистрации падающих фотонов. Каждый поглощённый фотон вызывает импульс тока большой амплитуды, ограниченной схемой, и эта амплитуда $\sim I_{\max} R$ значительно больше шумов предусилителя. Регистрируются (считаются) именно эти инициируемые фотоном импульсы. Как видим, здесь перестают сказываться и флуктуации (шумы) коэффициента умножения, как это имеет место для линейного допробойного режима. При охлаждении и низком темпе темновой генерации обнаружение вообще может ограничиваться флуктуациями самого сигнала. Так что ЛФД действительно “венец фотодиодостроения” и тем более при работе в счётном режиме.

Для ЛФД, работающего в режиме счёта фотонов, вводят специальные параметры.

1. Быстродействие. Определяется временем t_B от момента поглощения фотона до максимального развития лавины. Тонкие области объёмного заряда (ОПЗ), сильные поля в нём приводят к высокому быстродействию, так что t_B – это обычно субнаносекундные времена.

2. “Мёртвое” время t_M – это длительность переходного процесса от момента поглощения фотона до возвращения ЛФД вновь в рабочее состояние, когда он способен сосчитать следующий фотон. «Мёртвое» - потому что, пока лавина горит, другой фотон не может уже изменить состояние ЛФД, и этот фотон не сосчитывается (пока горит горелка, её нельзя зажечь вторично). “Мёртвое” время t_M определяется двумя факторами: схемой гашения (как быстро она сбросит напряжение, погасит зажжённую лавину, а затем восстановит перенапряжение) и прилипанием. К сожалению, область объёмного заряда (ОПЗ) не свободна от ловушек. При зажжённой лавине ОПЗ заливаётся свободными носителями, это даёт возможность агрессивным ловушкам захватить часть из них. Так что после гашения лавины надо не только вытянуть из ОПЗ размноженные носители, но и сделать “дополнительную передышку”, дать некоторое время для высвобождения носителей ловушек и также вытянуть их из ОПЗ сильным полем. Только после опустошения ловушек можно вновь подать перенапряжение, иначе выбросы с ловушек (так называемые “послеимпульсы”) приведут к ложным срабатываниям. “Мёртвое” время t_M примерно на два-три порядка больше времени t_B . Так что ЛФД реагирует на фотон быстро, но затем относительно долго “отдыхает”, готовясь к приёму следующего фотона. Perkin Elmer приводит для своих ФПУ с ЛФД значения $t_M \sim 30-70$ нс.

3. Темп (скорость) темнового счёта – это приведённые выше значения N_T (каждый генерированный фононом электрон сосчитывается). В каталоге приводятся также среднеквадратичные значения $\sqrt{N_T}$:

$\sqrt{N_T} = \sqrt{50} \approx 7$ пар носителей в секунду (при диаметре 0,18 мм);

$\sqrt{N_T} = \sqrt{256} \approx 22$ пар носителей в секунду (при диаметре 0,475 мм).

Очевидно, что значения N_T и $\sqrt{N_T}$ ограничивают параметры обнаружения в счётном режиме.

4. Квантовая эффективность детектирования (обнаружения) в счётном режиме – дополнение «детектирования» указывает на то, что в счётном режиме общая квантовая эффективность падает. Ведь существует некоторая конечная вероятность того, что фотоэлектрон пролетит через лавинный слой, не сынициировав лавину. Выше указывалось, что в «обычном» режиме квантовая эффективность кремниевых ФД (ЛФД) может приближаться к единице. В каталоге Perkin Elmer для счётного режима по указанной причине приводятся более скромные значения: 0,7 (при диаметре 0,18 мм) и 0,5 (при диаметре 0,475 мм). Однако такие значения квантовой эффективности детектирования фирма гарантирует при поставке ЛФД в составе ФПУ (о чём несколько ниже). Для отдельно поставляемых ЛФД гарантируются только значения $\geq 0,05$, ведь этот параметр очень критичен к рабочему напряжению.

Кремниевый ЛФД в счётном режиме рассматривают как твердотельный ФЭУ, как альтернативу вакуумным ФЭУ [3]. Внутренний фотоэффект (а не внешний) обеспечивает одно из основных преимуществ ЛФД – высокую квантовую эффективность. Возможность интеграции с микросхемами, возможность временного стробирования – это тоже существенные преимущества ЛФД. Но и ФЭУ не остаётся без преимуществ: это большая фоточувствительная площадка, это пикосекундное временное разрешение.

В [3] приведён ряд возможных применений твердотельных ФЭУ, таких как дальнометрия, биология, позитронная эмиссионная томография. Например, для томографов необходимы ЛФД с большим динамическим диапазоном и малым t_M . Чтобы уменьшить «мёртвое» время, нашли красивое решение – разработали мозаичные ЛФД. Вся фоточувствительная площадка мозаичного ЛФД ($\sim 1 \text{ мм}^2$) разделена, например, на тысячу ЛФД-элементов. Последовательно с каждым ЛФД-элементом сформировано гасящее сопротивление, и всю тысячу цепочек «элементарный ЛФД-сопротивление» соединяют параллельно. И если зажглась лавина в одном из элементарных ЛФД, то остальные «незажжённые» 999 элементарных ЛФД способны считать следующие падающие фотоны, выдавать последующие импульсы на выходе такого мозаичного ЛФД. Скажем иначе: в одну воронку два снаряда не попадут, точно также не попадёт в зажжённый ЛФД-элемент следующий, второй фотон (точнее, вероятность этого события исчезающе мала, всего одна тысячная). Конечно, «мертвое время» каждого ЛФД-элемента в составе мозаики не изменяется, но эффективное «мертвое время» в мозаике в целом, как нетрудно видеть, по порядку величины уменьшилось в тысячу раз. И, что важно для томографа, в ту же тысячу раз (по порядку величины) растёт и динамический диапазон D , так как $D \sim 1/t_M$. Действительно, в гипотетической модели, когда фотоны следуют друг за другом с равным интервалом и каждый из них вызывает импульс длительностью $\sim t_M$, на интервале в одну секунду может уложиться только $\sim 1/t_M$ импульсов. Стало быть, чем меньше длительность импульса t_M , тем большее их количество прибор способен сосчитать за заданное время.

В работе [4] приведены последние достижения по мозаичным ЛФД. Площадка прибора ($1 \times 1 \text{ мм}^2$) типична для таких приборов. Типично для ЛФД и перенапряжение – рабочее напряжение превышает пробивное на 4 В. Квантовая эффективность детектирования 0,4, «мертвое время» ~ 65 нс. Сравните: Perkin Elmer приводит для одиночных ЛФД близкие значения, соответственно 0,5-0,7 и 30-70 нс. Темп темного счёта для мозаики указан равным $N_T = 200000$ пар в секунду. Так как в мозаике

тысяча ЛФД-элементов, то в пересчёте на один ЛФД-элемент получим в среднем $N_T \sim 200$ пар в секунду. Это также сопоставимо с N_T для одиночных ЛФД фирмы Perkin Elmer, у которых $N_T \sim 50-500$ пар в секунду. Но если сравнивать удельные по площади значения, то разработчики мозаики пока не приблизились к лучшим одиночным ЛФД. По-видимому, сказывается большой периметр, разброс напряжений пробоя по ЛФД-элементам, усложненная технология.

Лавинное умножение, режим счёта фотонов продолжают привлекать пристальное внимание исследователей. Ряд новых результатов будет приведён в последующих разделах обзора.

3.2. Фотоприёмники на основе InGaAs/InP. Напомним: рассматриваются фотоприёмники на диапазон спектра 0,38-2 мкм. Безусловным лидером в области до 2 мкм стали ФП на основе гетероструктуры InGaAs/InP. Они прошли тот же путь, что и первопроходцы, кремниевые ФП: сначала были разработаны ФД, затем *pin*-ФД, ЛФД, ЛФД с разделёнными областями поглощения и умножения и, как увидим ниже, матрицы.

Основной задачей одноэлементных ФП на основе InGaAs/InP является приём излучения лазеров на 1,3-1,55 мкм, которые, кстати, изготавливаются на подобных же гетероструктурах.

Фотодиоды. И опять каталог фирмы Perkin Elmer. В него включены ФД только с оптимизированной *pin*-структурой. Каталог свидетельствует: на указанной структуре разработаны *pin*-InGaAs/InP-ФД как с малым диаметром площадки 0,05-0,2 мм для волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСПИ), так и с большим диаметром площадки 0,5-5 мм для самых различных лазерных оптико-электронных систем. *Pin*-ФД обладают высокой чувствительностью к лазерному излучению: для длины волны 1,55 мкм она равна 0,95А/Вт и несколько ниже – 0,85А/Вт для длины волны 1,3 мкм. ФД с малой площадкой (диаметра до 0,1 мм) могут принимать оптические сигналы с СВЧ-модуляцией: их полоса частот простирается до 3,5 ГГц! ФД, предназначенные для ВОСПИ, собираются в специальные корпуса, которые обеспечивают оптический контакт со стандартным оптическим волокном как многомодовым (диаметра 50 мкм, 62,5 мкм), так и одномодовым (диаметра 9 мкм). О качестве оптического контакта свидетельствует исчезающе малая величина обратного отражения: от входного окна ФП отражается не более одной двадцатитысячной доли падающей оптической мощности. Поражают удивительно низкие значения темнового тока: в зависимости от диаметра площадки он измеряется долями пикоампера – десятком пикоампер (типовая плотность этого тока 2-20 нА/мм²). В широкой полосе шумы столь малого тока пренебрежимо малы по сравнению с шумами усилителя, поэтому особо важна разработка ЛФД.

Лавинные фотодиоды. Каталог Perkin Elmer является зеркалом современного уровня разработок не только ФД, но и ЛФД на основе InGaAs/InP. ЛФД для ВОСПИ в полосе частот 3 ГГц (диаметр площадки 0,03 мкм) или 0,2 ГГц (диаметр площадки 0,2 мкм) обеспечивают лавинное умножение в десять раз. Десять раз – это, конечно, не сто и более раз, как в Si-ЛФД. Но для таких частот усиление на порядок является серьезным достижением. Выше указывалось, что в ряде материалов лавина инициируется не одним типом носителей, а двумя, что увеличивает хаос и шумы. Таким “нехорошим”

свойством обладают InP (это материал слоя размножения InGaAs/InP-ЛФД) и, добавим, его менее удачливый конкурент Ge: отношение коэффициентов ударной ионизации носителей κ в InP порядка 0,4, а в Ge ещё хуже - порядка 0,8. Поэтому из-за заметного расшумливания нет смысла “разгонять” усиление, оно ограничивается обычно значениями 10-20.

Многие фирмы изготавливают InGaAs/InP-ЛФД на основе структуры с разделёнными областями умножения и поглощения [5]. Обычно такие ЛФД представляют собой даже не *p_{in}*-, а более сложную *p(i)n_{in}*-структуру. То есть дополнительная лавинная *i*-область высокой напряжённости электрического поля формируется между *p*- и *n*-областями. Это даёт возможность разработчику задавать ширину области умножения, “держат её в руках”. Вторая широкая *i*-область стандартна, она предназначена для поглощения излучения.

Счётный режим. Выше указывалось, что в счётном режиме ни значение M , ни шумы умножения роли не играют. Поэтому понятно стремление разработчиков получить счётный режим именно на InGaAs-ЛФД, в которых шумы лавины в линейном режиме весьма и весьма заметны. И эта многотрудная задача была решена [5,6]. По перенапряжению (~ 5 В) и по квантовой эффективности детектирования ($\eta_{\text{сч}} = 0,22$ [5], $\eta_{\text{сч}} = 0,45$ [6]) разработанные ЛФД близки к Si-ЛФД Perkin Elmer. Описанные в [5,6] ЛФД обладают высоким быстродействием $t_{\text{б}} = 5 \cdot 10^{-11}$ с. Серьёзные отличия, и не в лучшую сторону, неизбежны по двум другим параметрам. Так как в $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ запрещённая зона примерно в полтора раза уже, чем в кремнии, то темп темнового счёта InGaAs-ЛФД выше порядка на три: при 200 К приводятся значения 10^5 пар/с [5] и $1,2 \cdot 10^4$ пар/с [6] (сравним: в Si-ЛФД Perkin Elmer этот темп 50-250 пар/с при 253 К). Хуже и “мертвое время”: приведены его значения 100 нс [5] и даже 300 нс (в Si-ЛФД Perkin Elmer, как мы указывали, “мертвое время” составляет 30-70 нс). И это вызвано отнюдь не схемой гашения, она гасит импульс за 2 нс, даже на дав ему достичь максимума. По совершенству InGaAs, конечно, не может сравниться с кремнием: в этом тройном соединении много ловушек. Частота послеимпульсов, то есть выбросов с ловушек сразу после гашения, оказалась значительной. Это и вынуждает разработчиков ждать столь длительное время, чтобы ловушки опустошались [6].

Но, конечно, реализация счётного режима в InGaAs-ЛФД является очередным достижением фотоэлектроники.

3.3. Германиевые фотодиоды. Рассматривая ФП на область спектра 0,38-2 мкм, нельзя не сказать о германиевых ФД, чувствительность которых простирается до 1,7 мкм. Германию обязана полупроводниковая электроника своим появлением: ещё раз повторим, что на нём в 1948 году Шокли, Бардин, Браттейн изготовили первый изобретённый ими транзистор. В том же году из германия Шрайв изготовил и первый фотодиод. Но сегодня Ge-ФД уступили (почти уступили) своё место InGaAs-ФД. В более “молодых” InGaAs-ФД несколько выше чувствительность к лазерному излучению с длиной волны 1,55 мкм (так как сильнее поглощение на этой длине волны), эта чувствительность падает при охлаждении слабее, чем в Ge-ФД. Вследствие прямозонности InGaAs эффективные массы, собственная концентрация носителей заряда и поэтому ток термогенерации существенно меньше (выше были приведены

плотности тока для InGaAs-ФД $\sim 2\text{-}20$ нА/мм²), тогда как в Ge-ФД он в среднем порядка на два выше ~ 1 мкА/мм². Но всё же Ge-ФД остаются в фотоэлектронике. Сказываются традиции, технологический опыт, относительно невысокая стоимость. В германии меньше концентрация примесей (чем в InGaAs), что важно при изготовлении *pin*-структур с малой ёмкостью. Так что одно- и малоэлементные Ge-ФД остаются в каталогах фирм, включая Hamamatsu.

Лавинные фотодиоды на основе Ge. Счётный режим. Примерно в начале 1980-х годов на Ge был освоен выпуск лавинных фотодиодов. И вновь здесь напрашивается сопоставление с InGaAs/InP-ЛФД. В обоих приборах в ионизации активно участвуют не только один тип носителя, который первоначально инициирует лавину, но и второй тип носителя. Вследствие размножения второго типа носителя лавина разветвляется сильнее, становится больше возможных цепей умножения. Вследствие этого флуктуация умножения (шумы) становится значительной. Вследствие этого оптимальные коэффициенты умножения в ЛФД на этих материалах ограничены достаточно близкими и относительно невысокими значениями $\sim 10\text{-}20$.

И, наконец, на Ge-ЛФД был также реализован режим счёта фотонов [7, 8]. Здесь сказалось интересное преимущество Ge по сравнению с InP: по-видимому, как монокристалл Ge обладает меньшей концентрацией ловушек. Авторы обеих названных работ отмечают, что в Ge-ЛФД по сравнению с InGaAs/InP-ЛФД существенно меньше частота послеимпульсов (то есть частота выбросов носителей после гашения лавины). В [8] конкретно указано: при охлаждении эта частота меньше в десять раз. Ясно, что «мертвое время» также было меньше, чем в InGaAs/InP-ЛФД. И, может быть, германий сумеет использовать этот шанс в своем противостоянии с InGaAs/InP-ЛФД.

3.4. Фотоприёмные устройства. Именно на рассматриваемый диапазон спектра 0,38-2 мкм приходятся если не все, то подавляющее число разработок фотоприёмных устройств (ФПУ). И вновь каталог фирмы Perkin Elmer отражает современное состояние этой области фотоэлектроники. Нашего воображения не хватит, чтобы придумать ФПУ, отсутствующее в этом каталоге. Здесь представлены ФПУ с Si *pin*-ФД на все частотные диапазоны: на очень низкие частоты (полоса пропускания $\sim 1,3\text{-}20$ Гц), на звуковые частоты (полоса пропускания ~ 180 Гц), на средние (1,2-5 МГц) и высокие (40-100 МГц) частоты. Такая дифференциация по частотам понятна: чем ниже частота, тем может быть большим сопротивление нагрузки, значит, меньше токовый шум, значит, лучше параметры обнаружения. Низкочастотные ФПУ (180 Гц) содержат двухкаскадный термоэлектрический охладитель (ТЭО). Охлаждение, высокое сопротивление (порядка нескольких гигаом) позволяет обнаружить рекордно малую для этой серии пороговую мощность (чувствительность) оптического сигнала $\Phi_{\text{п}}$ $\sim 5 \cdot 10^{-14}$ Вт! В других модификациях пороговая чувствительность $\Phi_{\text{п}}$ размещается на быстродействие: при увеличении полосы частот в 500000 раз пороговая чувствительность ухудшается в 10000 раз, в каталоге приводятся значения $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ Вт.

И, конечно, нельзя не отметить ещё три важнейших класса ФПУ: ФПУ для ВОСПИ, ФПУ для счёта фотонов и ФПУ для пультов дистанционного управления.

ФПУ для ВОСПИ «срослось» с ВОСПИ, является одним из узлов, составной частью ВОСПИ. И так сильно срослось, что потеряло своё имя. По аналогии с

другим узлом, передающим оптическим модулем, его называют приёмным оптическим модулем (ПРОМ). И параметры такого ФПУ, извините, ПРОМ, нестандартны для фотоприёмников и являются параметрами ВОСПИ в целом. Вот два важнейших параметра:

1. скорость передачи B [бит в секунду]. Связь B с типовым параметром ФПУ – с полосой частот F зависит от формата передачи (кодировки). В типовом случае так называемого NRZ-формата $F \approx 0,7 B$.

2. порог чувствительности ПРОМ $P_{\text{п}}$. Он определяется как минимально допустимая мощность на его входе. Не путать с применяемым в фотоэлектронике порогом чувствительности $\Phi_{\text{п}}$ для ФП и ФПУ. Дело в том, что пороговые чувствительности (мощности) $P_{\text{п}}$ и $\Phi_{\text{п}}$ определяются для разных условий. В фотоэлектронике все пороговые характеристики определяют при единичном отношении сигнала к шуму $N_{\text{ш}} \equiv 1$. В англоязычной литературе это условие непосредственно входит в сам термин и его обозначение: $\Phi_{\text{п}} \equiv \text{NEP}$, Noise Equivalent Power (“шуму эквивалентная мощность”). Мощность $P_{\text{п}}$, как указывалось, это и параметр ВОСПИ. А в ВОСПИ важна усреднённая по посылке мощность $P_{\text{п}}$. В NRZ-формате оптический импульс амплитуды $P_{\text{а}}$ отделяется от других посылок паузой, поэтому $P_{\text{п}} = 0,5 P_{\text{а}}$. При этом минимально допустимое отношение $N_{\text{ш}}$ должно быть не менее 12,2-12,9. Лишь тогда вероятность ошибки приёма не будет превышать требуемого минимума 10^{-9} - 10^{-10} соответственно (при нормальных шумах). Таким образом, для одного и того же изделия пороговая мощность $P_{\text{п}}$ оказывается примерно в шесть раз больше пороговой мощности $\Phi_{\text{п}}$, точнее: NRZ-формат, $P_{\text{п}} = 0,5 P_{\text{а}} \approx 0,5 (12,2-12,9) \Phi_{\text{п}} = (6,1-6,4) \Phi_{\text{п}}$.

Но это ещё не всё. Для разработчиков ВОСПИ актуально затухание в оптическом волокне, а оно измеряется в децибелах. Пороговая мощность ПРОМ $P_{\text{п}}$ выражается не в ваттах, а... в тех же децибелах! Физическая трактовка такова: пусть мощность эталонного передающего оптического модуля равна 1 мВт. Каково тогда допустимое затухание волокна при использовании на выходе этого волокна ПРОМ с пороговой мощностью $P_{\text{п}}$? Так получим формулу для расчёта $P_{\text{п}}$ в специфических единицах [дБм]:

$$P_{\text{п}} [\text{дБм}] = 10 \lg (P_{\text{п}} [\text{Вт}] / 1 \text{ мВт}) = 10 \lg ((6,1-6,4) \Phi_{\text{п}} / 10^{-3} \text{ Вт}).$$

Как видим, в обозначении специфической единицы пороговой мощности ПРОМ [дБм] добавлена буква «м», что означает милливатт, затухание от такого начального уровня мощности.

Скажем уже привычное: каталог фирмы Perkin Elmer поражает широким выбором ПРОМ. Приборы систематизированы по двум сериям. В сериях TZ и SR использована унифицированная электроника с трансимпедансным усилителем. ПРОМ серии TZ комплектуются как *pin*-ФД, так и ЛФД на основе как Si, так и InGaAs/InP. ПРОМ серии SR предназначены для сетей SONET для приёма излучений 1,3 и 1,55 мкм и стандартных скоростей передачи 50, 155, 622, 1200 Мбит/с, а также 2500 Мбит/с. Приём осуществляют как *pin*-ФД, так и ЛФД на основе InGaAs/InP (для скорости 2500 Мбит/с применяются только ЛФД). Естественно, при самых низких для этой серии скоростях 50 Мбит/с обеспечивается наилучшая для ФД пороговая чувствительность – минус 40-43 дБм (разброс объясняется типом образца). Повышение скорости в 25 раз – до 1200 Мбит/с ухудшает пороговую чувствительность на 13 дБм. И

неудивительно: как и в случае ФПУ с Si-ФД, пороговые свойства размениваются на частотные. Выше указывалось, что InGaAs/InP-ЛФД имеют $M \approx 10$. Поэтому замена ФД на ЛФД улучшает пороговую чувствительность практически на порядок (почти на 10 дБм). Нельзя не привести предельные значения: наилучший порог $P_{\text{п}} = -48$ дБм (при $B = 155$ Мбит/с), а самая высокая скорость передачи $B = 2,5$ Гбит/с (при $P_{\text{п}} = -34$ дБм).

Эти впечатляющие цифры – промышленные достижения фотоэлектроники сегодня. Линия со скоростью 2,5 Гбит/с эксплуатируется. По одному волокну можно передать, например, все центральные вещательные FM и TV станции Москвы. А в начале нынешнего века в лабораториях Японии, США, Франции на экспериментальных оптических линиях получены скорости $\sim 1000-2000$ Гбит/с. В интервале 1,54-1,6 мкм по одному волокну передавали 10-50 мод. Скорость передачи каждого канала (на каждой моде) доведена до $\sim 20-160$ Гбит/с. А завтра фотоэлектроника нацеливается на ещё более фантастические рубежи: скорость передачи $B \sim 400000$ Гбит/с!!! Эта фантастика подкрепляется расчётами. Новые технологии кварцевых волокон позволили убрать поглощение с максимумом в окрестности 1,4 мкм и получить небывало широкое окно прозрачности $\sim 1,2-1,7$ мкм. Здесь можно расположить уже не 50, а ~ 2500 оптических каналов (мод). И ПРОМ будут обязаны принять оптические сигналы пикосекундной длительности со всех каналов.

Ещё один тип ФПУ – ФПУ с ЛФД, работающим в счётном режиме. Эти ФПУ – показательный пример проектирования: в состав ФПУ включено всё, что только нужно для счётного режима. Это двухкаскадный ТЭО, охлаждающий ЛФД до температуры минус 20°C. Именно при этой температуре получен указанный выше сверхнизкий темп темного счёта 50-250 пар носителей в секунду. Это – прецизионная схема подачи высокого пробивного напряжения, она обеспечивает высокую для такого режима и указанную выше квантовую эффективность детектирования $\approx 0,5-0,7$. Это активная схема гашения, она обеспечивает очень малое “мёртвое время” $\sim 20-70$ нс. А ещё предусилитель, пороговое устройство, TTL-выходная электроника. Рассматриваемые ФПУ предназначены для самых чувствительных оптико-электронных систем, в том числе для активных оптических локаторов и дальномеров.

И, наконец, последний тип ФПУ, который рассмотрим, – это ФПУ для систем дистанционного управления. Такие ФПУ выпускают, в частности, фирмы Siemens, Sharp, Vishay Telefunken, на постсоветском пространстве – фирма Интеграл (Минск). Эти ФПУ отличаются высокой функциональной насыщенностью: электроника осуществляет аналоговое усиление фотосигнала фотодиода, ограничивает этот фотосигнал, осуществляет демодуляцию, выделяя кодовую последовательность (зашифрованную команду). Конечно, эти ФПУ не поражают воображение своими фотоэлектрическими характеристиками, как ПРОМ или ФПУ для Гейгер-режима. Однако ФПУ для систем дистанционного управления, вероятнее всего, можно считать победителем среди всех изделий фотоэлектроники по номинации «массовое производство». Точных данных по объёмам производства у нас нет, но ведь мировой выпуск видео- и аудиоаппаратуры, бытовой техники с системами дистанционного управления (и, следовательно, с ФПУ для них) измеряется сотнями миллионов штук. Конкурировать с рассматриваемым ФПУ в части крупносерийного производства

могут себе позволить фотоприёмники для лазерных приводов – считыватели информации с CD и DVD, а также фотоматрицы для цифровой видео- и фотоаппаратуры. Перейдём к рассмотрению матриц.

3.5. Матричные ФПУ.

Матричные ФПУ на основе кремния. Кремниевые матричные ФПУ (фотоматрицы) являются большим и самостоятельным направлением твёрдотельной фотоэлектроники. Разработкой и производством ПЗС-фотоматриц занимается большое число фирм. Назовём фирмы Fairchild (фирма Bell и Fairchild были пионерами ПЗС [9]), Amtel, Reticon, Kodak (США), Dalsa (Канада), Sony (Япония). Как видим, среди освоивших выпуск фотоматриц есть известные производители кино- и фотоаппаратуры. В России специальные ПЗС разрабатывает фирма «Пульсар». Чтобы уделить фотоматрицам достойное внимание, потребуется, по крайней мере, удвоить объём обзора, что, увы, невозможно. Поэтому отметим только отдельные достижения.

От всего класса фотоматриц делегируем в общую таблицу по матрицам на все спектральные диапазоны (стр. 18) два ярких представителя – матрицу телевизионного формата 576x768 (~0,44 мегапикселов) для цифровых видеокамер и матрицу с восемью мегапикселями для цифровых фотокамер. Сегодня налажен массовый выпуск видео- и фотоаппаратуры с подобными фотоматрицами. Эта аппаратура доступна и популярна. В видеокамере ПЗС-фотоматрица формата 576x768 обязана работать в реальном масштабе времени с телевизионной кадровой частотой 25 Гц. Такой режим обеспечивает строчно-кадровая структура ПЗС-фотоматрицы: половина ячейки является фоточувствительной (относится к секции накопления), а половина – затемнённой (относится к секции хранения). По окончании накопления фотозаряда в фотоячейках он быстро переносится в затемнённые ячейки секции хранения. В течение следующего кадра секция хранения опрашивается, а фотоячейки секции накопления накапливают фотозаряды следующего телевизионного кадра. Очевидно, что фоточувствительная площадка может составлять не более половины площадки пикселя-ячейки (остальную половину, затемнённую часть ПЗС-ячейки, занимает секция накопления). Реально эта доля (так называемый коэффициент заполнения) составляет 30-40%.

Другая из названных фотоматриц с восемью мегапикселями предназначена для фотокамеры. Количество мегапикселов примерно в двадцать раз больше, чем у предыдущей матрицы, поэтому опрос за телевизионное время кадра проблематичен. Но это и не нужно. Фотоматрица построена по кадровому принципу: представляет собой одну секцию, все ячейки фоточувствительны, так что коэффициент заполнения близок к единице. После накопления (после экспозиции) фотоматрица затемняется с помощью механического затвора фотоаппарата, начинается опрос. Из-за большого числа пикселов опрос может продолжаться вплоть до секунды.

Параметры рассмотренных фотоматриц не являются рекордными ни по формату, ни по размерам ячейки. Для телевидения высокой чёткости разработан ПЗС формата 1080x1920, а из призов по формату можно назвать матрицу, разработанную фирмой Philips Imaging Technology для астрономии, с форматом 7000x9000 пикселов и с размерами кристалла 110x86 мм². Для систем технического зрения созданы как однорядные линейки ПЗС с числом ячеек от 2000 до 14000, так и многорядные линейки – так называемые ВЗН-ПЗС форматов 1024x64, 1024x128, 2048x93. «ВЗН»

расшифровывается как «временная задержка и накопление». ВЗН-ПЗС для конкретности формата 1024x64 можно рассматривать как совокупность 64 линейек по 1024 ячейки в каждой линейке. Изображение наблюдаемого объекта сканируется по поверхности ВЗН-ПЗС, например, за счёт установки на летательном аппарате. Все 64 линейки последовательно накапливают фотозаряды, генерированные излучением от одних и тех же точек объекта. Затем соответствующие фотозаряды суммируются, фотоотклик, таким образом, увеличивается в 64 раза.

Проводятся работы и по уменьшению размеров ячейки, сообщается о создании фото-ПЗС с размерами ячеек 2,4·2,4 мкм², в перспективе ПЗС с ячейками, размеры которых ~ 2·2 мкм².

Как видим, разработчики фото-ПЗС скоро встанут в один ряд с самым великим разработчиком – с природой, создавшей человеческий глаз. Число «ячеек-пикселей» в сетчатке глаза – палочек и колбочек – порядка 10⁸, так что количество ячеек в ПЗС фирмы Philips (0,63·10⁸) близко к этой цифре. Диаметр колбочек минимален в центре сетчатки и порядка 1-2 мкм (размер 2-4 мкм тоже близок к этой цифре). Пространственное разрешение при таких размерах приближается к теоретическому дифракционному пределу. Чувствительность специальных фото-ПЗС, как и глаза, также близка к теоретическому квантовому пределу. А по быстродействию, по диапазону спектральной чувствительности Si фото-ПЗС со дня своего рождения превосходили человеческий глаз.

Ещё один тип стремительно развивающихся Si фотоматриц – КМОП фотодиодная матрица [10]. Её также называют КМОП фотодиодной сверхбольшой интегральной схемой (КМОП-ФД-СБИС). Идеологически (схемотехнически) она аналогична рассматриваемым ниже ИК-матрицам: матрица фотодиодов состыкуется с матричной микросхемой. В ИК-матрицах микросхемы формируются на Si-кристалле, а ФД изготавливают на более узкозонных полупроводниках. Естественно, в рассматриваемом приборе и матрица Si-ФД, и матричная Si сверхбольшая интегральная схема представляют собой единую интегральную Si-СБИС. Одним из решающих преимуществ КМОП-ФД-СБИС является возможность их выпуска по массовой унифицированной КМОП-технологии. Этой технологией владеют практически все современные электронные фирмы, выпускающие цифровые и аналоговые микросхемы. А ПЗС-технология освоена не всеми фирмами. Это одна из причин того, что после своего появления (в середине 1990-х годов) КМОП-ФД-СБИС стремительно развивались, и сегодня объём их выпуска превышает объём выпуска фото-ПЗС. Другим важным преимуществом КМОП-ФД-СБИС является технологическая совместимость собственно фотоматрицы и микроэлектронных схем. Это даёт возможность включить в состав КМОП-ФД-СБИС различные аналоговые и даже цифровые блоки (программное управление, столбцовые усилители, аналого-цифровые преобразователи – АЦП). Обработка фотосигналов может начинаться уже в пикселе. Высокое разрешение технологии позволяет реализовать здесь классические схемы обработки изображения – выделение контура, выделение малоразмерной цели. Фирма Hyundai ещё в 2001 году сообщила об однокристалльной цифровой СБИС. На едином кристалле расположены и КМОП-ФД-СБИС, и все другие необходимые электронные блоки видеокамеры. Это выходит за пределы наших представлений о традиционных ФПУ. Это, если и не видеокамера, то электронная

часть видеокамеры!

АНОНС! Венцом фотодиодостроения, как отмечалось, является ЛФД. А венцом матриц соответственно можно считать матрицу с ЛФД в каждом пикселе. Разработка таких матриц завтрашнего дня начата и не только на кремнии. Эти разработки мы рассмотрим в завершающих разделах нашего обзора.

Матричные ФПУ на основе InGaAs/InP [11,12]. Почти во всём совершенны кремниевые фотоматрицы, почти во всём - потому что как квантовые фотоприёмники они, естественно, имеют длинноволновые ограничения по спектру области собственного поглощения, конкретно для Si это 1,1 мкм. Конечно, это лучше, чем спектр глаза, но данный раздел посвящен приборам на диапазон спектра до 2 мкм. И на этот диапазон (до 2 мкм) матрицы тоже нужны, прежде всего, для приборов ночного видения (ПНВ) и астрономии. Ведь на эту область приходится основное излучение звёздного неба в стандартных условиях звёздной и безлунной ночи. О матрицах на гетеросистеме InGaAs/InP, чувствительных до 1,7-1,8 мкм, уже говорилось в первой части обзора. Упоминалось, что матрицы InGaAs/InP ведут атаку едва ли не на последний бастион вакуумных приборов – ЭОП. Теперь мы видим, почему. Область собственного поглощения InGaAs согласована с излучением звёздного неба. Расчёт показывает, что на эту область приходится в 50 раз больше «звёздных» фотонов, чем на область чувствительности ЭОП (при GaAs-фотокатоде она обрывается уже на ~0,9 мкм). Кроме того, InGaAs-матрицы имеют преимущество перед ЭОП, как твердотельные приборы перед вакуумными.

Современные квантовые ИК-матрицы являются гибридными. Термин “гибридная матрица” встречался в настоящем обзоре, по крайней мере, два раза: в разделе о КМОП ФД-матрицах и в разделе об УФ-матрицах (в первой части обзора). Отмечалось, что в гибридных ИК-матрицах «скрещивают» два кристалла: кристалл с фотоприёмниками (в данном случае, это кристалл InGaAs/InP) и Si-кристалл, в котором сформирована микросхема опроса и обработки фотосигнала. Стыковка этих кристаллов производится с помощью «мягких» In-столбиков, выращенных в каждом пикселе, в каждом кристалле. Подробнее микросхему рассмотрим в разделе по ИК-матрицам на диапазон свыше 2 мкм. Здесь остановимся на технологии InGaAs/InP ФД-матрицы. Эта технология аналогична технологии изготовления рассмотренных выше единичных *pin*-ФД и ЛФД на этом же тройном соединении. Поскольку состав тройной системы может меняться, то далее уточним запись: $In_xGa_{1-x}As$. Будет встречаться и четверная система $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$, которую также используют при изготовлении рассматриваемого типа матриц, чувствительных вплоть до длины волны 2,6 мкм.

Матрицу фотодиодов изготавливают из эпитаксиальных структур $In_xGa_{1-x}As$, выращенных на монокристаллических подложках из *InP*. Постоянная кристаллической решётки *InP* согласована с постоянной решётки $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ и составляет 0,5869 нм. Диаметр освоенных в производстве пластин *InP* достигает четырех дюймов и более. При этом в четверных соединениях $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$, также согласованных с *InP* по постоянной решётки, ширина запрещённой зоны при комнатной температуре изменяется от 1,38 эВ (длинноволновая граница чувствительности $\lambda_c = 0,9$ мкм для предельного случая *InP*) до 0,75 эВ ($\lambda_c = 1,7$ мкм для другого предельного случая $In_{0,53}Ga_{0,47}As$). И четверные соединения $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ и тройной состав $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ могут быть выращены

на подложке практически всеми известными эпитаксиальными методами. Однако наиболее совершенные слои получают химическим осаждением из паров металлоорганических соединений. Распространение получили относительно простые фотодиоды на основе гетероструктур $In_{0,53}Ga_{0,47}As/InP$ с *pin*-ФД в тройном соединении. Они чувствительны в спектральном диапазоне 0,9-1,7 мкм. ФД имеют или меза-, или чаще планарную структуру. Облучение планарных фотодиодов обычно производится со стороны подложки. Облучаемая поверхность покрывается антиотражающей плёнкой.

Отметим также, что при реальных кадровых частотах время диффузии фотоносителей в $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ оказывается много меньше времени кадра; что ФД могут использоваться даже при нулевом смещении. При комнатной температуре произведение R_0A для лучших фотодиодов из $In_{0,53}Ga_{0,47}As/InP$ достигает $2 \cdot 10^6 \dots 10^7$ Ом·см², а их обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности составляет $10^{13} \dots 10^{14}$ Вт⁻¹ смГц^{1/2}. При охлаждении до 196К обнаружительная способность увеличивается до 10^{16} Вт⁻¹ смГц^{1/2}.

С использованием многослойных буферных слоёв или градиентных структур на подложках из *InP* удалось вырастить эпитаксиальные слои прямого соединения $In_xGa_{1-x}As$ со значениями x , составляющими 0,67, 0,71 и 0,82. На этих структурах были изготовлены одно- и многоэлементные фотодиоды с правой границей спектральной чувствительности при 2,0, 2,2 и 2,6 мкм соответственно. В последнем случае буферная структура представляет собой, например, набор из 6 тонких слоёв (толщиной ≈ 1 мкм) соединения $InAs_yP_{1-y}$, слабелегированного донорами. Значения y в этих слоях меняются и равны 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 и 0,6. При этом дислокации несоответствия, возникающие в буферных слоях из-за разности постоянных решётки, практически не проникают в фотоактивную область $In_{0,82}Ga_{0,18}As$. Однако вследствие меньшей ширины запрещённой зоны и увеличенной концентрации генерационно-рекомбинационных центров в $In_{0,82}Ga_{0,18}As$ (по сравнению с $In_{0,53}Ga_{0,47}As$) произведение R_0A для фотодиодов с $\lambda_{sp} \geq 2$ мкм при комнатной температуре обычно не превышает 10^3 Ом·см², а их удельная обнаружительная способность составляет $\geq 10^{11}$ Вт⁻¹ смГц^{0,5}.

Промышленно выпускаются линейные фотоприёмные устройства на основе $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ и $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ с числом элементов 128...512 и матричные формирователи сигналов изображения с форматами от 128x128 до 1280x1024. Основными фирмами-производителями, кроме известной нам по Si-ФД фирмы Hamamatsu (Япония), являются фирмы Goodrich|SensorsUnlimited, Teledyne Imaging Sensors|Rockwell, FLIR|Indigo Systems, Fermionics и другие (США), XenlCs (Бельгия). В последней фирме матрицы изготавливаются на подложках из арсенида галлия. Типовые параметры неохлаждаемых гибридных фокальных матриц на основе $In_xGa_{1-x}As$ приведены в таблице.

В последние годы появились сообщения о разработках *InGaAs*-матриц с ЛФД в каждом пикселе. Их можно рассматривать как новое поколение завтрашнего дня. Таким матрицам посвятим завершающий раздел обзора.

Матрицы на основе широкозонного $Cd_xHg_{1-x}Te$. Альтернативой рассмотренным матрицам *InGaAs/InP* являются матрицы фотодиодов на тройном соединении $Cd_xHg_{1-x}Te$ при $x=0,7$. Матрица на таком материале также представлена в таблице. Матрицы самых больших форматов 2048x2048 и 1024x1024, чувствительные в диапазоне 1...2,5 мкм, первоначально разрабатывались для космической астрономии. В настоящее

Типовые параметры фокальных матриц для ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов

Спектральный диапазон, мкм	Тип матриц	Материал	Форматы матриц	Шаг, мкм	Время интегрирования, мс	Параметр обнаружения
1	2	3	4	5	6	7
0,25÷0,29	Смотрящая солнечно-слепая	ФД AlGaN/GaN	256*256	34	40	D^* $3 \cdot 10^{13}$
0,3÷0,4	Смотрящая видимо-слепая	ФД AlN/AlGaN/GaN	128*128, 320*256	38	40	$1 \div 6 \cdot 10^{13}$
0,4÷1,1	ПЗС строчно-кадровый перенос	ПЗС-Si	768*576	4,5	≤33-40	H $0,2 \div 1 \cdot 10^{-3}$
	кадровый перенос	ПЗС-Si	8500*8500	3		$0,2 \div 1 \cdot 10^{-3}$
1÷1,7 (2,6)	Смотрящая	ФД CdHgTe	2048*2048 1280(1024)*1024 1000*256, 320*256	18÷40		I_T 0,03±0,3
	Смотрящая	ФД InGaAs/InP	1280(1024)*1024 640*512(480) 320*240, 128*128	12÷40	10±25	D^* $10^{12} \div 10^{13}$
3÷5	Смотрящая	ФД InSb	2K*2K 1024*1024(768) 640*512(480) 320(256)*256(240) 128*128	20÷50	0,2±2,0	NEDT 5÷30 (80K, F/2)
	Смотрящая	ФД CdHgTe	2048*2048 1280*1024 640*512(480) 384*288, 256*256 128*128	20÷50	0,2±2,0	NEDT 7÷50 (80K, F/2)
	Сканирующая	ФД CdHgTe	480*6, 384*2 288*4			NEDT 20÷40 (80K, F/2)
	Смотрящая, квантовые ямы		2K*2K 1024*1024			NEDT 18 (95K, F/2,5)
	Смотрящая, сверхрешётки	InAs/GaSb	320(256)*256	40	5	NEDT 12 (80K, F/2)
8÷14	Смотрящая	ФД CdHgTe	640*480 320(256)*256(240) 128*128	25÷50	0,02±0,2	10÷20 (80K, F/2)
	Сканирующая	ФД CdHgTe	768*8, 576*10 (6), 480*6, 288*4	20÷50	0,005÷0,05	NEDT 20÷50 (80K, F/2)
	Смотрящая, квантовые ямы		1024*1024 640*512 (480) 320*256 (240)	25÷40	10÷20	NEDT 15÷35 (70K, F/2)
	Смотрящая, сверхрешётки	InAs/GaSb	320(256)*256	40	0,23	NEDT 33 (80K, F/2)
	Смотрящая, микролометр		2K*2K 1024*1024 640*512(480) 384(320)*288(240) 160*120	15:50	4:25	NEDT 30÷50 ($f=30\text{Гц}$)

Примечания:

- $D^*[\text{Вт}^{-1} \text{Гц}^{1/2} \text{см}]$ - удельная обнаружительная способность;
 - $H=E \cdot t[\text{лк} \cdot \text{с}]$ - экспозиция (произведение освещённости E на поверхности матрицы и времени экспозиции t);
 - $I_T[\text{электрон/с}]$ - темновой термогенерационный ток;
 - $\text{NEDT}[\text{mK}]$ - эквивалентная шуму разность температур;
- Для ИК-матриц в скобках указана рабочая температура, параметр оптики F/2, частота кадров f .

время матрицы из широкозонного $CdHgTe$ нашли применение и в системах ночного видения при естественной освещенности. У матриц с форматом 1024x1024 для спектрального диапазона 0,8...1,7 мкм темновой ток пиксела не превышает 0,4 электрон/с при температурах до 145К. Чтобы достичь столь же малых значений темнового тока в аналогичных матрицах на спектральный диапазон 0,8...2,5 мкм, их приходится уже охлаждать до азотных температур. Темновой ток ~ 0,25 электрон/с в указанных матрицах получен при 78К.

Само соединение $Cd_xHg_{1-x}Te$ сыграло и играет выдающуюся роль в истории и в современной фотоэлектронике, оно часто будет упоминаться на страницах следующего раздела.

3. Фотоприёмники для ближнего, среднего и дальнего ИК-диапазонов

Этот раздел посвящен прежде всего ИК-матрицам для тепловидения и теплопеленгации. Рассматриваются матрицы смотрящего и сканирующего типов, квантовые матрицы на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$, $InSb$ и квантоворазмерных структур, а также тепловые матрицы. Будет приведена информация о состоянии разработок и некоторых других типов фотоприёмников на спектральный диапазон 2-14 мкм. Читайте следующий номер журнала “Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы”.

Литература

1. Hamamatsu: Photodiodes. Catalog – www.Hamamatsu.com 2008.
2. Perkin Elmer: Emitters and Detectors. Catalog, -www.las.perkinelmer.com 2008.
3. V. Chioni, A. Gulinatti, I. Rech et al. Progress in Silicon Single-Photon Avalanche Diodes. – *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(4), p.p.852-862.
4. A. G. Stewart et al. Performance of 1 мм² Photomultiplier. – *IEEE J. of Quantum Electronics*, 2008, 44 (2), p.p. 157-164.
5. A. Tosi, A. Gallivanoni, F. Zappa, S. Cova. Gated Operation of InGaAs SPADs with Active-Quenching and Fast Timing Circuits. – *SPIE*, 2006, 6372, 6372OQ.
6. M. Lio, C. Hu, X. Bai. High-Performance InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Photodiode. – *IEEE Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(4) p.p. 887-893.
7. J. G. Seamong et al. High beat rate Ge single photon detectors for 1310 мм. - *Proc. SPIE*, 2008, 6976, 697607.
8. A. Tosi, S. Cova et al. Ge and InGaAs/InP SPADs for single-photon detection in the near infrared. – *Proc. SPIE*, 2008, 6771, 6771OP.
9. W. S. Boyle, G. E. Smith. Charge Coupled Semiconductor Devices. – *BSTJ*, 1970, p.p. 587-593.
10. А. М. Филанев, И. И. Таубкин, М. А. Трищенко. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2007, 384с.
11. D. G. Turner et al. The development of and applications for, extended response (from 0,7 to 1,7 мм) InGaAs FPA's. - *Proc. SPIE*, 2008, 6940, 694037.
12. J. Martin et al. A 640x512 InGaAs Camera for Range-Gated and Staring Application. – *Proc. SPIE*, 2006, 6206, 620609.