

Порог чувствительности фотоприемного устройства, подверженного воздействию мощного лазерного излучения

А.А. Короннов¹, А.Е. Сафутин¹, М.М. Землянов¹, Г. М. Зверев^{1,2}

¹НИИ «ПОЛЮС» им. М.Ф. Стельмаха

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Введение

Требования к характеристикам фотоприемного устройства (ФПУ) во многом определяются параметрами системы, в состав которой оно входит. Рассматриваемые в настоящей работе ФПУ для систем лазерной импульсной дальнометрии имеют ряд особенностей перед другими типами фотоприемников. К ним можно отнести высокий динамический диапазон; малое время восстановления после засветки интенсивным стартовым импульсом; широкий диапазон рабочих температур $-60..+60$ °С; рабочие длины волн, лежащие в окнах прозрачности атмосферы (1.06 и 1.54 мкм). Помимо этого, повышение точности измерения расстояния современными импульсными дальномерами до 0.3 — 1 м, достигнутое в основном за счет применения излучателей, формирующих длительность зондирующих импульсов 7 — 10 нс [1], в свою очередь определило необходимость детектирования таких сигналов фотоприемным устройством с высоким временным разрешением. Одновременно с этим, уменьшение массогабаритных размеров дальномеров подразумевает снижение энергетики лазера и как следствие повышение чувствительности ФПУ.

Другой особенностью работы ФПУ в составе импульсного лазерного дальномера является высокий риск выхода из строя в результате засветки мощным лазерным излучением. Таким образом, необходимо с одной стороны обеспечить стойкость ФПУ к мощной засветке, а с другой защитить ФПУ в составе дальномера от нежелательного воздействия лазерным излучением. В связи с этим особый интерес представляет рассмотрение режимов работы

дальномера, при которых возможно воздействие мощной засветки, и поиск путей защиты от нее. При этом следует выделить 3 основных случая. К первому из них относится случайная засветка на сборочно-наладочном этапе производства, когда поводится проверка работоспособности дальномера при наведении на близкорасположенную цель-экран в отсутствие установленного в оптической схеме ослабления. Единственным действенным средством защиты в этом случае является строгое соблюдение технологических инструкций.

Выведение из строя дальномерной системы средствами лазерного противодействия относится ко второму случаю. При этом эффективным средством защиты является повышение скрытности (снижение отражения оптики на пеленгующей длине волны, обычно 0.9 мкм). Помимо этого в работе [3] предложена конструкция, предназначенная для защиты средств оптического наблюдения от мощной засветки, принцип которой проиллюстрирован на рисунке 1.

Принимаемое излучение фокусируется на грани стекла с напыленной пленкой, которая при больших плотностях мощности испаряется, что предотвращает засветку фотодиода мощным оптическим импульсом. К другому средству защиты можно отнести нелинейно-оптические ограничители лазерного излучения. В работе [4] представлен обобщающий обзор результатов исследований в этой области и рассмотрены лимитеры с быстродействием менее 1 нс на основе оптических эффектов в суспензиях с углеродными нано-частицами (астраленами) и полупроводниках, возникающих при поглощении мощного излучения. При этом показано, что оптическое ограничение в астраленовых средах при фокусировке излучения наступает при значительно большей энергетике излучения (более 1 мкДж) чем в полупроводниках и полупроводниковых нано-частицах (менее 10 пДж). Тем не менее применение лимитеров в системах импульсной лазерной дальнометрии, несмотря на их быстродействие и на диапазон рабочих

мощностей, затруднено в связи с ограниченным рабочим температурным диапазоном.

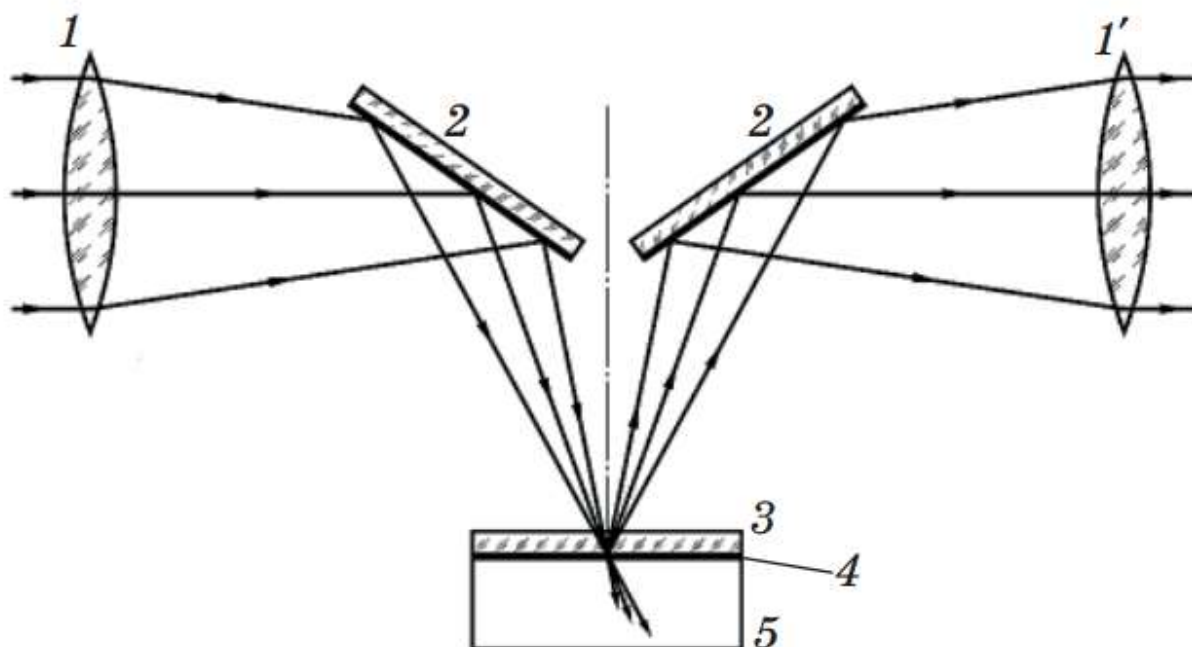


Рисунок 1. Принципиальная схема пассивного оптического затвора. 1 и 1' – входной и выходной объективы, 2 – плоские зеркала, 3 – прозрачная подложка, 4 – прожигаемая зеркальная пленка, 5 – ловушка для потока направленного лазерного излучения, прошедшего через затвор.

В третьем случае, при измерении расстояния до цели со специально установленными на ней уголковыми отражателями или покрытой специальной краской возвращенной мощности может оказаться достаточно для разрушения фотодиода. Применение двухимпульсного режима в ряде приборов позволило в значительной степени уйти от этой проблемы. Суть его заключается в следующем: первое измерение проводится при установленной перед фотоприемником шторкой-фильтром с ослаблением 10^{-4} , и если цель имеет высокий коэффициент отражения, то принимаемое фотоприемником излучение имеет допустимый уровень мощности и производится измерение расстояния до цели. Если цель безопасная, то отраженного сигнала

недостаточно для ее обнаружения, тогда шторка опускается и производится повторный замер, в результате которого измеряется расстояние. Однако, для движущихся или вращающихся целей, например башня танка, или движущийся автомобиль с катафотами, имеющие неоднородный характер отражения поверхности двухимпульсный метод не всегда эффективен, это связано с тем, что первый замер может быть проведен по безопасному участку цели, а при втором измерении по хорошо отражающей поверхности. Тогда мощный оптический импульс приводит к ослеплению фотоприемного устройства, и более того, может вызвать частичную или полную деградацию фотодиода. В этом случае существенное значение имеет стойкость фотоприемного устройства к мощной засветке.

Стойкость ФПУ к лазерному излучению преимущественно определяется стойкостью чувствительного элемента, который в свою очередь выбирается исходя из требований, предъявляемых по чувствительности и быстродействию. Для рассматриваемых длин волн этот выбор ограничен фотодиодами на основе германия, и соединений A_3B_5 . Однако помимо чувствительного элемента существенное значение также имеет сохранение работоспособности усилителя после интенсивной засветки фотодиода. Поскольку задача повышения чувствительности является первоочередной при разработке ФПУ, следует рассмотреть, каким образом может влиять та или иная реализация усилителя на стойкость ФПУ к засветке мощным лазерным излучением.

Анализ предельной чувствительности ФПУ, проведенный в ряде работ [1,2] показывает необходимость повышения сопротивления нагрузки фотодиода, и построение усилителя с оптимальной амплитудно-частотной характеристикой для достижения наилучшего соотношения сигнал/шум [3]. На практике реализация такого усилителя сопряжена с рядом технологических трудностей, из которых наиболее существенными являются снижение паразитной емкости во входной цепи и повышение входного сопротивления усилителя.

Поскольку причиной выхода из строя фотодиода может являться превышение предельно допустимого значения тока при его засветки мощным сигналом, то для повышения надежности работы ФПУ также необходимо высокое сопротивлением нагрузки, ограничивающее этот ток. Повышение же входного сопротивления усилителя преимущественно осуществляется за счет применения полевого транзистора на входе усилителя. Однако для высокочастотных полевых транзисторов значения допустимых исток-стокового и затвор-стокового напряжений значительно ниже, чем у биполярных транзисторов соответственно напряжений коллектор-эмиттер и коллектор-база. В результате для обеспечения надежной работы ФПУ после засветки неразрушающим лазерным излучением наиболее приемлемо использование биполярных транзисторов и высокого сопротивления нагрузки. Именно такую структуру имеют фотоприемные устройства на базе эпитаксиальных германиевых ЛФД серийно выпускаемых НИИ «ПОЛЮС» такие как ФПУ-20, ФПУ-21В, ФПУ-21ВТ, ФПУ-26, ФПУ-29, ФПУ-32. Заявленная чувствительность этих фотоприемных устройств составляет 100 нВт на длине волны 1.064 мкм, при длительности оптического импульса по полуамплитуде 10 нс, а также при вероятности правильного обнаружения 0.5 и вероятности ложной регистрации 10^{-3} . Однако статистические исследования, проведенные для 15 образцов ФПУ-20, показали, что их чувствительность составляет 58 нВт при среднеквадратическом отклонении характеризующим выборку 6 нВт, и в настоящее время такой уровень чувствительности является приемлемым для большинства дальномеров.

С другой стороны значительный прогресс в области фотоприемных устройств был совершен американской фирмой Analog Modules, которой в 2013 году был разработан на базе лавинного InGaAs фотоприемный модуль «Model 758A.1». Чувствительность настоящего устройства на длине волны 1.064 мкм при длительности оптического импульса 6 нс составляет 8 нВт с фотодиодом, имеющим диаметр чувствительной площадки 200 мкм, и 6 нВт для 80 мкм фотодиода. При этом вероятность правильного обнаружения

составляет 0.5, а вероятность ложной регистрации 10^{-3} [2]. В это же время в рамках опытно конструкторской работы «Атолл» в НИИ «ПОЛЮС» было разработано фотоприемное устройство с близкими параметрами, где в качестве чувствительного элемента также был использован A_3B_5 фотодиод, а на входе усилителя применялся полевой транзистор.

Стоит отметить, что на сегодняшний день такие результаты по чувствительности являются наилучшими, и отличаются на порядок по сравнению с ФПУ на базе германиевых ЛФД. Однако применение фотоприемных устройств на базе A_3B_5 фотодиодов сопряжено с высоким риском выхода их из строя вследствие мощной засветки. По данным, представленным в ряде источников [3..6], при длительности оптического импульса 4 – 20 нс допустимый уровень плотности мощности воздействия на фотодиод лежит в диапазоне $1 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5$ Вт/см², что для засветки пучком имеющем в поперечном сечении диаметр 200 мкм эквивалентно диапазону импульсной мощности излучения 30...150 Вт.

Одновременно с этим, многолетний опыт применения германиевых ЛФД, показывает, что аналогичный уровень мощности воздействия не приводит к ухудшению их характеристик. Более того анализ отказов вследствие мощной засветки фотоприемных устройств на основе германиевых ЛФД показал, что в большинстве случаев на площадке фотодиода различимы дефекты абляционного характера. Это позволяет сопоставить по интенсивности воздействия стойкость фотодиода со стойкостью германия. Другим немаловажным преимуществом германиевых ЛФД является их стоимость, которой в значительной степени уступают фотодиоды на базе соединений A_3B_5 .

Таким образом, учитывая выше сказанное, особый интерес представляет рассмотрение применения фотоприемных устройств на базе германиевого ЛФД в системах импульсной лазерной дальнометрии с повышенными требованиями по стойкости к воздействию лазерного излучения высокой мощности. Однако, задача повышения стойкости ФПУ к

лазерному излучению на сегодняшний день не подвергалась глубокому рассмотрению. В единственном известном источнике [10], где представлены результаты исследования стойкости германиевых ЛФД к мощной засветке рассматриваются диффузионные фотодиоды. В связи с этим обретает актуальность исследование стойкости к лазерному излучению эпитаксиальных германиевых ЛФД с целью определения значения предельно допустимой мощности засветки и поиска путей повышения стойкости к лазерному воздействию фотоприемных устройств ФПУ-20, ФПУ-21В, ФПУ-21ВТ, ФПУ-26, ФПУ-29, ФПУ-32.

Структура фотоприемных устройств на базе германиевого лавинного фотодиода

Исследование упомянутых фотоприемных устройств подвергнутых мощной засветке целесообразно проводить, имея представления об их структуре и применяемом фотодиоде. Поскольку схемотехника рассматриваемых ФПУ однотипна, и подробно описана в ряде отчетов [12], при ее рассмотрении в настоящей работе достаточно ограничиться структурной схемой, представленной на рисунке 2.

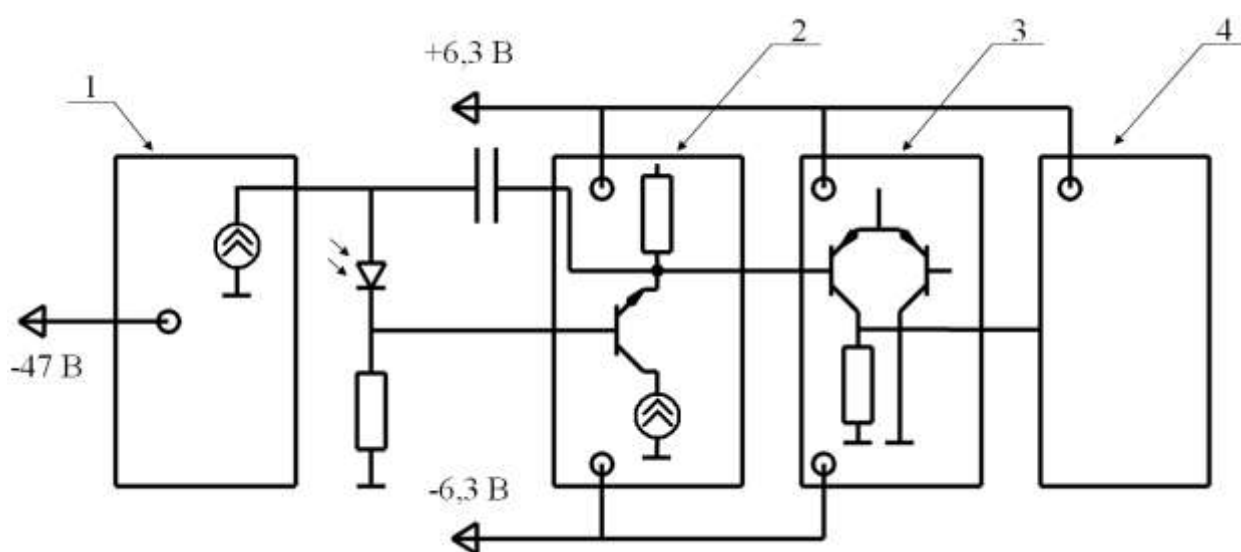


Рисунок 1.3. Блок-схема ФПУ с указанием напряжений питания. 1 – блок температурной регулировки коэффициента лавинного умножения, 2 – блок температурной регулировки коэффициента лавинного умножения, 2 – блок

предварительного усилителя, 3 – блок дифференциального усилителя, 4 – блок компаратора.

Поскольку применение ЛФД сопряжено с такой трудностью как обеспечение оптимального коэффициента лавинного умножения в диапазоне температур, в ФПУ предусмотрен блок температурной регулировки, реализуемый на фотодиоде, работающем в режиме стабилитрона, и специально подбираемом по характеристикам в пару рабочему фотодиоду.

Усиление полезного сигнала поступающего с рабочего фотодиода осуществляется дифференциальным усилителем, согласованного с нагрузкой фотодиода специальным малошумящим высокочастотным предварительным усилителем. Далее усиленный сигнал поступает на компаратор и в случае превышения его амплитуды порогового напряжения на выходе ФПУ формируется цифровой импульс.

Как указывалось ранее, при такой реализации усилителя наиболее важным элементом ФПУ, от которого зависит как чувствительность, так и стойкость к лазерному излучению является фотодиод. В рассматриваемых ФПУ применяются фотодиоды, выполненные из структуры типа ЭГС-1-12, по меза-планарной технологии, и имеют геометрию, представленную на рисунке 3. Фотодиоды формируются с высотой мезы, превышающей на 1 мкм глубину залегания р-п перехода, а чашечка в р⁺ слое имеет глубину порядка 0.2 — 0.3 мкм. Уменьшение толщины р⁺ слоя имеет существенный положительный эффект поскольку не только снижает рекомбинацию фотоносителей в приповерхностном слое, но также приводит к увеличению поглощения в области р-п перехода, поскольку он оказывается ближе к поверхности.

Помимо этого, исполнение фотодиодов с диаметром чувствительной площадки 100 мкм, оказалось наиболее оптимальным балансом между требованиями определенными оптической схемой дальномерной системы, фотоэлектрическими характеристиками, необходимыми для достижения

наилучшей чувствительности (в первую очередь емкость и темновой ток), и технологическими возможностями.

Фотодиоды на базе структуры ЭГС-1-12 также выполняются с диаметром чувствительной площадки 200 мкм и 70 мкм. При этом наилучше стабильностью коэффициента лавинного умножения по площадке обладают 200 мкм фотодиоды. Это связано с тем, что в них контактная металлизация выполнена по периметру чувствительной площадки, а не сегментно, как на 150 мкм и 70 мкм фотодиодах. Наличие нескольких реализаций геометрии фотодиодов позволило провести более детальные исследования характера их разрушения вследствие мощной засветки лазерным излучением.

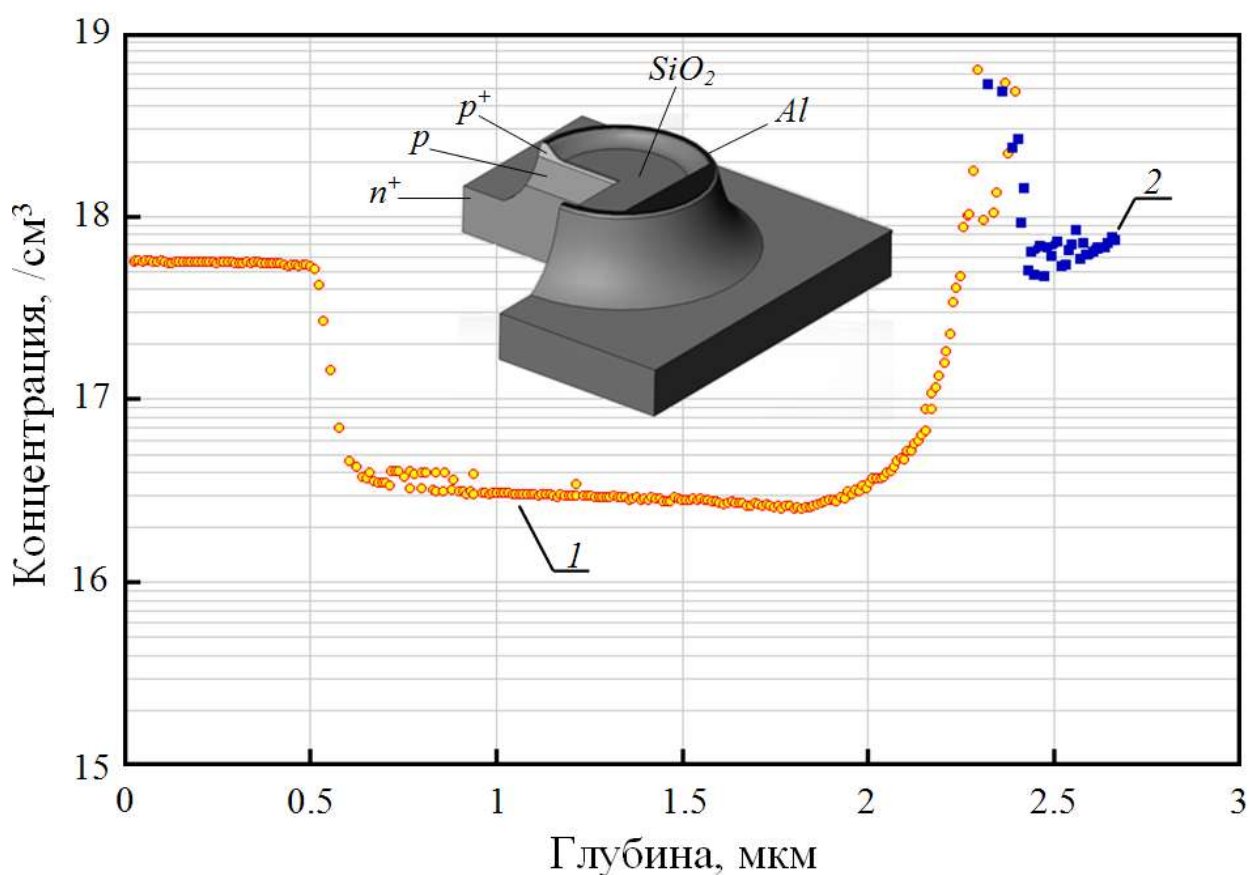


Рисунок 2. Распределение профиля концентрации легирующих примесей (1 – бор, 2 – фосфор) и конструкция фотодиода.

Стойкость фотоприемных устройств на базе германиевых лавинных фотодиодов к засветке мощным лазерным излучением

До недавнего времени информация о стойкости германиевых ЛФД к лазерному излучению имела весьма ограниченный характер и не позволяла однозначно определить допустимый уровень мощности воздействия на фотодиод. Однако, результаты исследований, проведенные в последнее время [5,6] в значительной степени осветили механизм разрушения фотодиода и изменения его характеристик после мощной засветки лазерным излучением. К основным результатам настоящих исследований можно отнести установленное значение плотности мощности 10^8 Вт/см² для 4-нс импульса лазерного излучения с длиной волны 1.064 мкм, воздействие которой приводит к ухудшению чувствительности фотодиода вследствие нарушения просветляющего покрытия. Помимо этого, в работе [6] показано, что даже в случае частичного разрушения германиевого ЛФД воздействием лазерного излучения, и возрастания его собственных шумов, возможно продолжение его эксплуатации при снижении чувствительности фотоприемного устройства. При этом требования, предъявляемые к значению вероятности ложной регистрации цели, могут быть выполнены в результате совместной или отдельной регулировки напряжения смещения на фотодиоде и порогового напряжения компаратора.

На сегодняшний день существует ряд решений [8,9], позволяющих провести автоматическую регулировку ФПУ в случае возрастания шумов фотодиода. При этом наиболее важной характеристикой, свидетельствующей о возможности продолжения эксплуатации ФПУ, будет являться его чувствительность. Изменение чувствительности при увеличении шумов фотодиода можно провести в результате рассмотрения шумовой модели усилителя ФПУ.

Поскольку шумы и рабочая полоса частот преимущественно определяются входной частью ФПУ, то принимая дифференциальный усилитель идеальным расчет соотношения сигнал/шум можно провести на основе эквивалентной схемы, представленной на рисунке 1.3.

Структуру применяемого в рассматриваемых ФПУ усилителя, можно рассматривать в виде схемы, состоящей из эмиттерного повторителя входной импеданс которого образуют элементы $C_{\text{вх}}$ и $R_{\text{вх}}$. Шум усилителя учитывается включением источника дробового шума тока базы и приведенным ко входу шумового генератора учитывающего шумовую составляющую в эмиттерной цепи. Эквивалентная схема фотодиода состоит из внутреннего сопротивления и емкости обратно смещенного $p-n$ перехода, включенных параллельно источнику сигнального тока и сопротивлению нагрузки. Шум фотодиода будет преимущественно определяться флуктуационной составляющей умножаемого тока. Помимо этого при оценке чувствительности фотоприемного устройства следует учитывать тепловые шумы резистивных элементов.

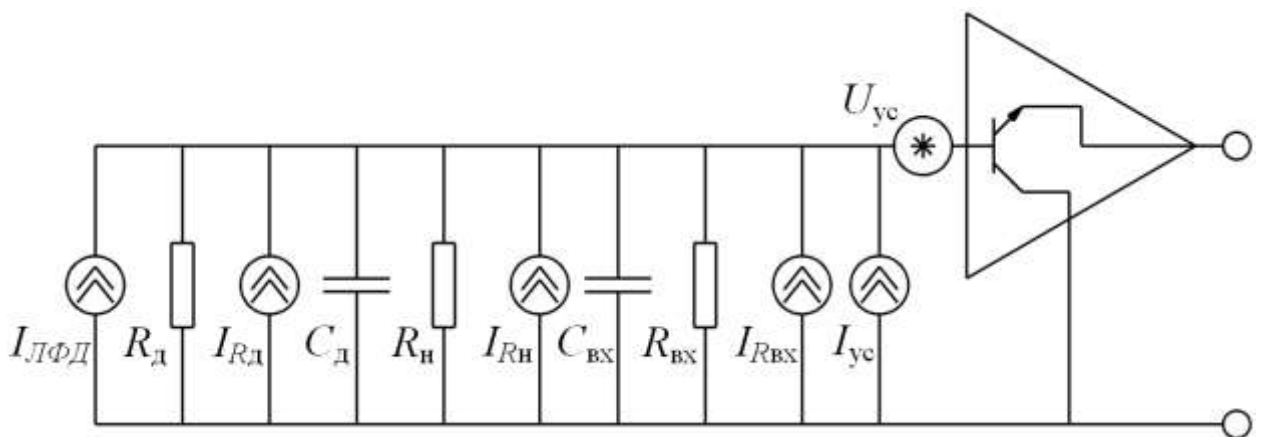


Рисунок 1.3. Эквивалентная шумовая схема усилителя

Запишем выражения для спектральных плотностей источников шума схемы:

$S_{\text{лфд}}(\omega) = 2 \cdot e \cdot \bar{I}_{\text{лфд}} \cdot M^2 \cdot F$ – шум, создаваемый токовым источником фотодиода $\bar{I}_{\text{лфд}}$. Здесь M – коэффициент лавинного умножения, F – шум-фактор лавины, который был определен как $M^{2,4}$.

$$S_{R_{\text{д}}}(\omega) = \frac{4 \cdot k \cdot T}{R_{\text{д}}} \text{ – тепловой шум фотодиода}$$

$$S_{R_H}(\omega) = \frac{4 \cdot k \cdot T}{R_H} - \text{тепловой шум сопротивления нагрузки}$$

$$S_{R_{BX}}(\omega) = \frac{4 \cdot k \cdot T}{R_{BX}} - \text{тепловой шум эквивалентного входного сопротивления}$$

$$S_{I_{yc}}(\omega) = 2 \cdot e \cdot \bar{I}_B - \text{дробовый шум усилителя, создаваемый током базы } \bar{I}_B.$$

$$S_{U_{yc}}(\omega) = \frac{2 \cdot (k \cdot T)^2}{e \cdot \beta \cdot \bar{I}_B} - \text{приведенный к входу шум коллекторного тока. Здесь}$$

β – коэффициент усиления транзистора по току.

Для спектральной плотности шума на выходе эмиттерного повторителя создаваемого токовыми источниками на полном входном сопротивлении

$$Z(j \cdot \omega) = \frac{(R_D \parallel R_H \parallel R_{BX})}{1 + j \cdot \omega \cdot (R_D \parallel R_H \parallel R_{BX}) \cdot (C_D \parallel C_{BX})}$$

будет справедливо следующее выражение:

$$S(\omega) = Z^2(\omega) \cdot [S_{\text{лфд}}(\omega) + S_{R_D}(\omega) + S_{R_H}(\omega) + S_{R_{BX}}(\omega) + S_{I_{yc}}(\omega)] + S_{U_{yc}}(\omega)$$

Рассмотрим случай выполнения условия $R_H \ll R_D \parallel R_{BX}$, что вполне справедливо для случая работы фотодиода в лавинном режиме на нагрузку шунтирующую входное сопротивление эмиттерного повторителя. Вводя для упрощения замену $C = C_D \parallel C_{BX}$ и $\tau = R_H \cdot C$ можно записать:

$$S(\omega) = \frac{R_H^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \cdot \left[2 \cdot e \cdot \bar{I}_{\text{лфд}} \cdot M^2 \cdot F + \frac{4 \cdot k \cdot T}{R_H} + 2 \cdot e \cdot \bar{I}_B \right] + \frac{2 \cdot (k \cdot T)^2}{e \cdot \beta \cdot \bar{I}_B}$$

Средний квадрат шумового напряжения на выходе цепи находится в соответствии с выражением

$$\overline{U_{\text{ш}}}^2 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\Delta \omega} S(\omega) d\omega$$

, где $\Delta \omega = \frac{1}{\tau}$ – верхняя граничная угловая частота, в пределах которой

проходят шумы и сигнал.

Используя табличный интеграл [6]

$$\int \frac{1}{\frac{1}{\tau^2} + \omega^2} = \tau \cdot \operatorname{arctg}(\omega \cdot \tau)$$

можно провести преобразование, в результате которого получим что на выходе дифференциального усилителя с коэффициентом усиления K , будет действовать шум с дисперсией:

$$\overline{U_{\text{ш}}}^2 = \frac{K^2 \cdot R_{\text{н}}^2}{4 \cdot \tau} \cdot \left[e \cdot \bar{I}_{\text{лфд}} \cdot M^2 \cdot F + \frac{2 \cdot k \cdot T}{R_{\text{н}}} + e \cdot \bar{I}_{\text{б}} \right] + \frac{K^2}{\tau} \cdot \frac{2 \cdot (k \cdot T)^2}{e \cdot \beta \cdot \bar{I}_{\text{б}}}$$

Поскольку вероятность ложной регистрации задается соотношением между пороговым напряжением компаратора H и среднеквадратическим значением шума на его входе [11], можно записать следующее выражение:

$$F = 1 - \Phi\left(\frac{H}{\overline{U_{\text{ш}}}}\right)$$

Таким образом, задаваясь постоянством значения вероятности ложной регистрации, можно определить необходимое значение порогового напряжения компаратора при возрастании шумов фотодиода вследствие его разрушения мощным лазерным воздействием. Одновременно с этим, в работе [6] показано, что при локальном воздействии на фотодиод ухудшение его чувствительности наблюдается только в области кратера, размеры которого как показывает опыт анализа отказов ФПУ, существенно меньше по сравнению с площадью чувствительной площадки. Поэтому амплитуду фотоотклика при засветке всей чувствительной площадки можно считать такой же, как и до воздействия. Поэтому для чувствительности S ФПУ при повышении порогового напряжения компаратора до уровня H можно записать

$$S = S_0 \cdot \frac{H}{H_0} \tag{3}$$

, где S_0 и H_0 – соответственно начальные значения чувствительности и порогового напряжения компаратора.

Приведенные выражения позволяют оценить приемлемый уровень шума фотодиода для обеспечения допустимой чувствительности ФПУ после воздействия мощным оптическим импульсом. Для рассматриваемых фотоприемных устройств можно принять следующие значения: $K = 120$, $R_H = 20$ кОм, $C = 0.3$ пФ, $\bar{I}_{\text{ЛФД}} = 100$ нА, $M = F = 5$, $\bar{I}_B = 1.7$ мкА, $\beta = 125$, $H = 150$ мВ. В результате, при вероятности ложной регистрации $F = 3.077 \cdot 10^{-8}$, пороговое напряжение компаратора составляет 150 мВ, и в соответствии с критерием Неймана-Пирсона соотношение сигнал/шум составляет 5.381 при вероятности правильного обнаружения 0.5.

Для амплитуды полезного сигнала на входе компаратора справедливо следующее выражение:

$$U_C = \Phi_0 \cdot S \cdot M \cdot R_H \cdot K \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{имп}}}{\tau}\right) \right)$$

, где S – ампер-ваттная чувствительность ЛФД, Φ_0 – значение падающей мощности оптического импульса длительностью $t_{\text{имп}}$. Принимая $S = 0.3$ А/Вт и $t_{\text{имп}} = 10$ нс, можно показать, что значение Φ_0 , или другими словами чувствительность ФПУ составляет 46.5 нВт. Стоит отметить, что полученный результат хорошо согласуется с экспериментальными данными указанными выше, по которым чувствительность ФПУ составляет 58 нВ.

Также можно показать, что допуская ухудшение чувствительности ФПУ до 100 нВт, среднеквадратическое значение шума фотодиода может быть увеличено до значения 4.85 пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Экспериментальные исследования фотодиодов деградировавших вследствие засветки лазерным излучением показали, что после однократного воздействия при мощности менее 900 Вт среднеквадратический шум ЛФД не превышает значения 4.85 пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Полученные результаты показывают, что применение систем автоматической регулировки фотоприемного устройства на базе германиевого ЛФД, позволяет повысить его стойкость к лазерному

излучению, достигающему мощности 900 Вт, что значительно превышает допустимое значение, установленное для фотоприемных устройств с A_3B_5 фотодиодами.