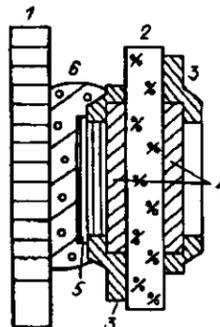


Рис. 2. Структура ПВМС типа ПРИЗ:
 1 — волоконно-оптическая пластина; 2 — кристалл силленита; 3 — контактные площадки; 4 — прозрачные электроды; 5 — диэлектрическое зеркало; 6 — оптический клей



дуляторов в качестве тест-объекта использовался транспарант с изображением телевизионной таблицы. Разрешающая способность составила не менее 15 л/мм по уровню видности полос в считываемом изображении $m = 0,05$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов Ю. Л., Кравченко В. Б., Куча В. В. Влияние легирования на электрооптические свойства монокристаллов $\text{Vt}_{12}\text{SiO}_{20}$ // Письма в ЖТФ.—1982.—7, вып. 4.
2. Гусев В. А., Деменко С. И., Детиненко В. А., Малиновский В. К. Пространственно-временной модулятор света типа ПРИЗ с повышенной чувствительностью // Автометрия.—1984.—№ 1.
3. Гусев В. А., Детиненко В. А., Соколов А. П. Фотохромный эффект и оптическая запись информации в силленитах германия, кремния и титана // Автометрия.—1983.—№ 5.

Поступила в редакцию 15 апреля 1992 г.

УДК 621.315.592

О. А. Гудаев, Э. Э. Пауль
 (Новосибирск)

ПРИРОДА ШУМА $1/f^\alpha$ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ФОТОРЕЗИСТОРАХ PbS

Проведены измерения спектральной плотности шума химически осажденных поликристаллических пленок PbS . Показано, что на образцах с хорошими контактами преобладает генерационно-рекомбинационный шум, сильно зависящий от температуры в диапазоне 300—160 К. При низких температурах преобладает шум вида $1/f$. На образцах с плохими контактами появляется избыточный шум со спектральной плотностью $1/f$.

Введение. Шум является одной из основных характеристик фотоприемника, определяющей пороговую чувствительность $P_{\text{пор}}$, т. е. минимальный полезный сигнал, который равен или несколько превышает шум $U_{\text{ш}} : P_{\text{пор}} = U_{\text{ш}}/S$, где S — характеристическая крутизна преобразования интенсивности света в напряжение сигнала.

Флуктуации потока излучения, падающего на фотоприемник, приводят к флуктуациям напряжения сигнала, следовательно, одним из источников шума является фоновое излучение. Этот источник шума принципиально неустрашим и характерен для любого типа фотопроводника. Минимизация шума этого вида достигается выбором оптимальной конструкции оптической системы, где используется фотоприемник, а именно выбором оптимального телесного угла обзора, оптического фильтра и апертуры. Шум, обусловленный флуктуациями потока фонового излучения, является идеальным пределом для фотоприемника. Реальный фотопреобразователь всегда обладает избыточным, свойственным для данного типа ФП-шумом, который зачастую намного превышает фоновый шум. Для фотоприемника на основе фоторезистора характерными являются следующие виды шумов: джонсоновский или тепловой шум, генерационно-рекомбинационный шум (ГР), шум вида $1/f$ или фликершум, а также в случае плохих контактов дробовой или барьерный шум. По-

сколькo среднсарифметическое от случайной величины, какой является напряжение шумов $U_{ш}$, равно нулю, для характеристики шумов используют среднеквадратичное, т. е. мощность шума. Под спектральной плотностью шума понимают величину

$$S_U(\omega) = \frac{\overline{U^2(\omega)}}{\Delta\omega}, \quad \Delta\omega \rightarrow 0,$$

где под частотной зависимостью $\overline{U^2(\omega)}$ подразумевают фурье-образ временных флуктуаций напряжения:

$$\overline{U^2(\omega)} = F(\omega; t)\overline{U^2(t)}.$$

Каждый из видов шума имеет свою природу и определенный вид спектральной плотности $S_U(\omega)$. Исследуя спектральную плотность шума $S_U(\omega)$ в различных условиях (температура, освещенность и т. д.), можно делать выводы о природе шума и методах его уменьшения.

Экспериментальные результаты. Исследовались образцы поликристаллических пленок PbS, полученных химическим осаждением на кремниевую подложку с подслоем SiO₂. Размеры образцов 40 × 50 мкм, толщина ≈ 0,8 мкм. Пленки осаждались на предварительно нанесенные на подложку планарные золотые электроды.

Шумы фоторезисторов измерялись низкочастотным анализатором спектра СКЧ-72. Этот измерительный комплекс состоит из анализатора спектра и интегратора. Анализатор спектра работает в режиме преобразования Фурье. Прибор позволяет проводить измерения в области частот 0,05—20 000 Гц, разбитых на несколько поддиапазонов. Для удобства усреднения, накопления и обработки спектров мы подключили СКЧ-72 к системе лабораторной автоматизации на базе микроЭВМ «Электроника-60 М», ДВК через регистр данных и программно организованный буферный регистр. Автоматизация многократно увеличивает возможности прибора. Анализатор спектра имеет режим измерения квадрата сигнала $U_{ш}^2(\omega)$, таким образом выходной сигнал пропорционален спектральной плотности шума $S_U(\omega)$. Поскольку чувствительность прибора в большинстве случаев недостаточна для измерения малых сигналов, какими являются шумы, мы использовали в качестве предусилителя с коэффициентом усиления 10⁶ малошумящий широкополосный вольтметр "Унирап-237" в режиме неселективного усилителя. Применение такого предусилителя ограничивает нижнюю рабочую полосу системы до ~1,5 Гц, поэтому измерения проводились в диапазоне частот 5—20 000 Гц. Для измерения шумов при разных температурах образец помещался в азотный оптический криостат с системой термостабилизации для области температур 80—400 К. Фоторезистор подключался по стандартной схеме, причем сопротивление нагрузки R_n выбиралось ≈ 0,1R_ф (при T = 300 К). Таким образом, измеряемый сигнал представлял собой шумовой ток $S_i(\omega)$.

Для контроля влияния качества контактов на шумовой спектр измерялось также распределение поля по длине фоторезистора методом светового зонда. Подробнее методика описана в [1].

Измеренная в эксперименте спектральная плотность шума подчиняется закону $1/f^\alpha$, где степень α лежит в пределах $1 \leq \alpha \leq 2$. При этом в основном значения α группируются около величин 1; 1,5 или 2. Экспериментальные спектры шума при различных температурах представлены на рис. 1, 2. При низких температурах преобладает в основном шум вида $1/f$, в то время как в области температур 300—140 К — шум с $\alpha = 1,5-2$. Эта составляющая шума имеет сильную температурную зависимость с максимумом в области 200—180 К. Для некоторых образцов увеличение мощности шума составляет до двух порядков. В области низких частот (десятки герц) для некоторых образцов напряжение шумов $\sqrt{U_{ш}^2}$ увеличивается с $0,7 \cdot 10^{-6}$ до $3,5 \cdot 10^{-6}$ В/Гц^{1/2}. При высоких температурах спектральная плотность шума имеет либо не зависящее

от частоты плато, характерное для ГР-шума, либо некоторую избыточную компоненту $1/f$ -шума.

Образцы с особенностями в приконтактной области (типа барьера Шоттки) обладают, как правило, повышенной мощностью шума, до порядка, интегрально по спектру. При понижении температуры барьерные свойства становятся более ярко выраженными, и при высоких напряжениях ($U > 40$ В) наблюдается переключение фоторезистора — так называемый «мягкий пробой». При этом меняется вид спектральной плотности шума (рис. 3). В высокочастотной области $f \geq 1000$ Гц до пробоя наблюдается характерная для барьеров компонента, не зависящая от частоты, — дробовой шум, причем после переключения ток возрастает более чем на порядок и высокочастотное плато исчезает.

Обсуждение. Общий вид спектральной плотности шума фоторезисторов PbS (см. рис. 1, 2) позволяет предполагать, что в области высоких температур (300—140 К) преобладает ГР-шум ($\alpha = 1,5$ или 2), а при более низких температурах основным становится шум $1/f$. Генерационно-рекомбинационный шум является неотъемлемым источником шума для фоторезисторов. Данный вид шума возникает из-за флуктуаций концентрации носителей около равновесной и процессов генерации рекомбинации. Поскольку носители могут вытягиваться из объема внешним электрическим полем, рекомбинировать на поверхностных центрах и т. д., генерационно-рекомбинационный шум может проявляться по-разному и сильно зависит от внешних условий. Для многих случаев спектральная плотность ГР-шума имеет довольно общий вид [2]:

$$S_i(\omega) = 4N\tau_0 / (1 + \omega^2 \tau_0^2). \quad (1)$$

Здесь N — некоторая лимитирующая концентрация, как правило, минимальная. Например, если концентрация свободных носителей $n \gg N_i$, где N_i — концентрация незанятых центров рекомбинации, то $N \approx N_i$, τ_0 — характерное время релаксации.

Существенное влияние на форму спектральной зависимости плотности ГР-шума может оказать диффузия [3]. При этом если время диффузии к контактам $\tau_d > \tau_0$ (длинный образец), спектр ГР-шума имеет обычный вид $S_i \sim \tau_0 / (1 + \omega^2 \tau_0^2)$ до частоты перегиба $\omega_1 \approx \tau_d / \tau_0^2$. В случае короткого образца ($\tau_d < \tau_0$) в области низких частот $\omega < \tau_d^{-1}$

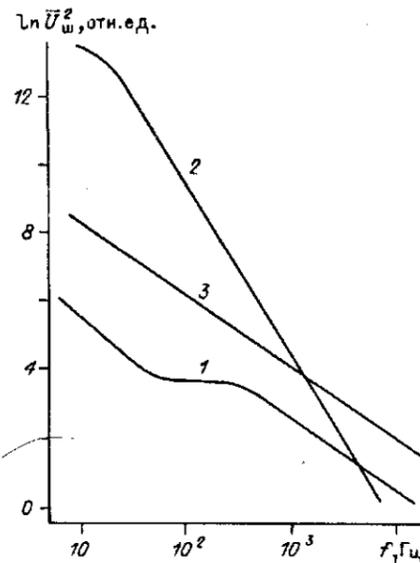


Рис. 1. Спектральная плотность шума при температурах (К):
1 — 300 ($\alpha = 1$); 2 — 180 ($\alpha = 2$); 3 — 82 ($\alpha = 1$)

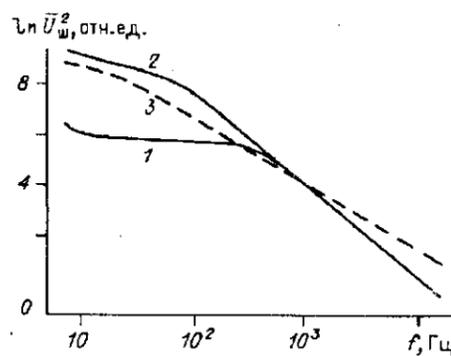


Рис. 2. Спектральная плотность шума при температурах (К):
1 — 300 ($\alpha = 1,5$); 2 — 180 ($\alpha = 1,5$); 3 — 82 ($\alpha = 1,2$)

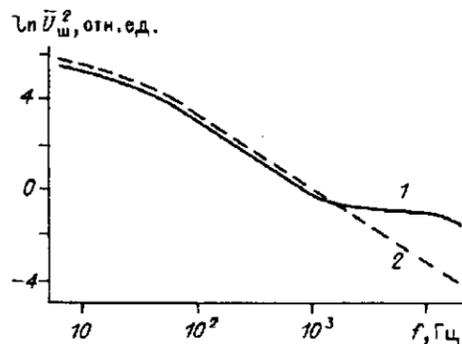


Рис. 3. Спектральная плотность шума образца с барьером Шоттки у контактов при $T = 140$ К:

1 — до пробоя; 2 — после пробоя ($\alpha = 1,3$)

$S_i(\omega) \approx \tau_d \cdot \text{const}$ имеет «плато», а в области высоких частот

$$S_i(\omega) \sim \frac{\text{const}}{\sqrt{2\tau_d}} \omega^{-3/2}. \quad (2)$$

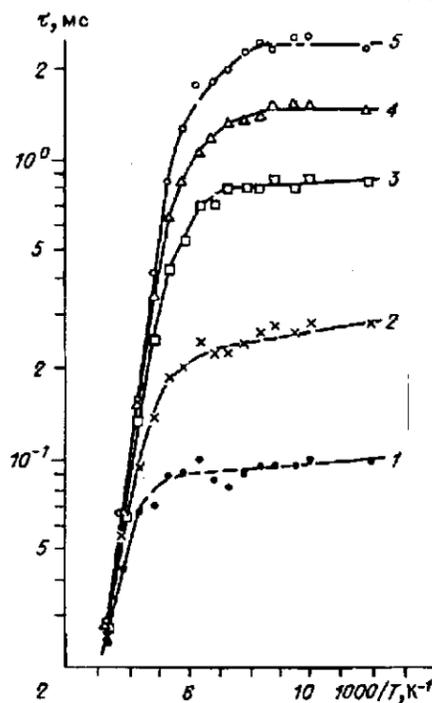
Такой же вид спектральная плотность шума может иметь и в том случае, когда скорость

поверхностной рекомбинации много больше скорости объемной рекомбинации.

Температурная зависимость ГР-шума имеет сложный характер. В области высоких температур (300—140 К) она определяется температурной зависимостью времени релаксации τ_0 [1]. На рис. 4 приведена температурная зависимость времени жизни неравновесных носителей в пленках PbS. τ_p экспоненциально возрастает при понижении температуры от 300 до 160—140 К, а далее почти не зависит от температуры. Активационная зависимость времени жизни в неупорядоченных материалах объясняется наличием флуктуаций потенциального рельефа [4], которые приводят к пространственному разделению фотовозбужденных носителей. Тогда для рекомбинации носителям необходимо преодолеть потенциальный барьер и время жизни:

$$\tau_p(T) = \tau_{p0} \exp(E_t/kT).$$

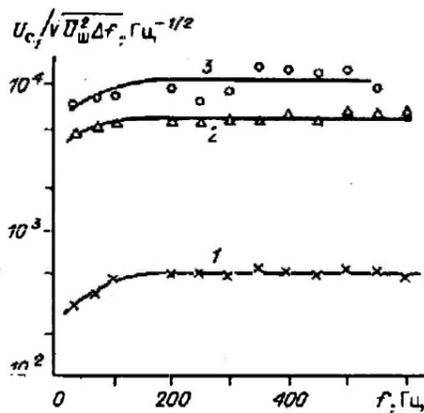
Нельзя ожидать, что время жизни неравновесных носителей τ_p и время релаксации τ_0 — это одно и то же время. Более того, время релаксации, оцененное по квадратичному участку кривой $S_i(\omega)$, больше (в некоторых случаях более



чем на порядок) времени жизни неравновесных носителей. Однако можно утверждать, что τ_p и τ_0 имеют одну природу и у них одинаковые температурные и частотные зависимости, т. е. $\tau_p = \gamma \tau_0$, γ — константа. Это проверялось следующим образом. Измерялась частотная зависимость отношения сигнала фотопроводимости на частоте ω к шуму в единичной полосе частот около этой частоты при разных температурах. Как видно из рис. 5, это отношение при всех температурах практически не зависит от частоты в диапазоне частот $10-10^3$ Гц. Таким образом, можно предполагать, что температурная зависимость времени релаксации τ_0 аналогична температурной зависимости — времени жизни неравновесных носителей τ_p — и в области относительно высоких

Рис. 4. Время жизни неравновесных носителей при разных интенсивностях возбуждения $I_1 > I_2 > I_3 > I_4 > I_5$

Рис. 5. Частотная зависимость отношения сигнал/нормированный шум при разных температурах (К):
1 — 240; 2 — 180; 3 — 140



температур определяется процессом надбарьерной температурной активации носителей.

Процессы долговременной релаксации, характерные для неупорядоченных материалов и приводящие к длинным рекомбинационным хвостам для фотопроводимости, являются, видимо, ответственными за то, что типичное для ГР-шума плато в области низких частот наблюдается не на всех образцах. В ряде случаев вместо плато имеет место медленное

($\alpha \leq 1$) нарастание шума в области низких частот. Это можно объяснить

суперпозицией шума вида $1/f$ и ГР-шума. При низких температурах ($T < 140$ К) наблюдается смена механизма рекомбинации. Вместо надбарьерной экспоненциально зависящей от температуры рекомбинации начинает преобладать подбарьерная туннельная, имеющая слабую температурную зависимость. С другой стороны, именно в этой области наблюдается сильная зависимость времени жизни неравновесных носителей от интенсивности света, что легко понять, если учесть, что свет может менять заполнение состояний вблизи уровня протекания и таким образом существенно влиять на процесс подбарьерного туннелирования (подробнее об этом в [5]). Туннельный механизм релаксации приводит к более широкому набору времен релаксации. Суперпозиция достаточно широкого набора лоренцианов в результате приводит к появлению шума со спектром $1/f$ [2]:

$$S_s(\omega) = \frac{\text{const}}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{d\tau}{(1 + \omega^2 \tau^2)} \rightarrow 1/\omega, \quad \begin{matrix} \tau_2 \rightarrow \infty, \\ \tau_1 \rightarrow 0. \end{matrix}$$

В качестве итога сделаем следующее замечание. В реальных образцах тонкопленочных фоторезисторов PbS имеются два источника шума: контакты и непосредственно объем фоторезистора. На образцах с ярко выраженными особенностями у контактов преобладает избыточный шум контактов. Спектральная плотность приконтактного шума, как правило, близка к $1/f$, однако он имеет более слабую температурную зависимость, чем ГР-шум. В итоге при температурах 180—140 К ГР-шум даже на таких образцах оказывается сравним с избыточным приконтактным шумом. В образцах с хорошими контактами преобладающим является ГР-шум. При низких температурах широкий спектр времен релаксации может быть одной из основных причин возникновения шума вида $1/f$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудаев О. А., Пауль Э. Э., Седельников А. П. Локальная неоднородность фоточувствительности химически осажденных слоев PbS // Автометрия.—1989.—№ 5.
2. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах.—М.: Мир, 1986.
3. Lax M., Mengert P. Influence of trapping, diffusion and recombination on carrier concentration fluctuations // J. Phys. Chem. Sol.—1960.—14, N 7.—P. 248.
4. Шейкман М. К., Шик А. Я. Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках // ФТП.—1976.—10, вып. 2.

5. Gudaev O. A., Malinovsky V. K., Paul E. E. The influence of photoexcitation level on the process of charge transfer in polycrystalline PbS films // Thin Solid Films.—1991.—198.—P. 35.

Поступила в редакцию 24 июня 1992 г.

УДК 681.142.67

В. П. Торчигин

(Москва)

НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОПТИЧЕСКИХ ВЕНТИЛЕЙ

Рассматривается подход к проектированию полностью оптических логических вентилях для цифровых оптических систем обработки и передачи данных, основанный на введенных понятиях оптического тока и напряжения. Анализируются оптические аналоги электронного триггера, автогенератора и мультивибратора.

Введение. В настоящее время работы по созданию полностью оптических вентилях стимулируются перспективой непосредственной обработки передаваемых по оптическим линиям связи сигналов в темпе, который такие линии допускают, т. е. более 10^{12} бит/с, и который не может быть обеспечен электронными средствами.

Трудности создания высокоскоростных полностью оптических вентилях связаны с тем, что малоинерционные нелинейные оптические среды, которые необходимы для создания таких вентилях, имеют слабые нелинейности. Поэтому требуются чрезвычайно высокие интенсивности оптического излучения (до 10^9 Вт/см²), чтобы создать заметное изменение оптических свойств нелинейной среды.

Известны два подхода для уменьшения требуемых интенсивностей. Первый предполагает использование оптических резонаторов, в которых интенсивность поля может быть увеличена в Q^2 раз, где Q — добротность резонатора. Второй подход предполагает использование систем из распределенно связанных нелинейных световодов. Короткие оптические импульсы, одновременно распространяющиеся по параллельным световодам, взаимодействуют друг с другом, причем эффект от взаимодействия накапливается постепенно и пропорционален времени взаимодействия и, следовательно, длине световодов.

В работе [1] обоснован принцип дуальности, согласно которому каждому резонаторному оптическому вентилю может быть поставлен в соответствие волноводный и наоборот. Это позволило рассмотреть несколько типов новых волноводных вентилях, для которых известны резонансные аналоги. В настоящей работе, если не оговаривается особо, имеются в виду оба типа вентилях.

Условия проектирования оптических вентилях качественно отличаются от условий проектирования электронных. В последнем случае имеется возможность соединить линиями связи различные компоненты (транзисторы, резисторы) вентилях, а также объединить несколько вентилях в систему. В первом случае такие широкие возможности отсутствуют, можно лишь организовать слабую связь через поля рассеяния между соседними резонаторами или световодами. Кроме того, можно организовать взаимодействие между различными резонаторными или волноводными модами. Однако в любом случае непосредственная связь с помощью световодов между оптическими вентилями, расположенными в одной плоскости, трудноосуществима.

Практически во всех проектах оптических систем для цифровой обработки оптических сигналов сигналы от вентилях излучаются перпендикулярно плоскости, в которой они расположены, каким-то образом коммутируются и поступают на вентили, расположенные в этой же или другой плоскости. Известен