

Кремниевый фотоумножитель

Введение

С развитием современных технологий (в т.ч. беспилотных автомобилей) становятся востребованы LiDAR (англ. Light Detection and Ranging) — приборы для измерения расстояния до объектов в режиме реального времени. Прибор посылает лазерные импульсы к объекту и измеряет время, через которое рассеянный сигнал будет принят фотодетектором. Одним из перспективных видов таких фотодетекторов, способных быстро детектировать короткие импульсы (< 1 нс) в широком динамическом диапазоне, являются ТФУ (твердотельные фотоумножители).

ТФУ образован матрицей параллельно соединенных ячеек. Каждая ячейка приближённо представляет из себя p - n переход на кремнии и нанесенный на него диэлектрический слой с утечкой (слой гашения). Кремний является полупроводником, и при нормальных условиях электроны в нем почти не проводят электрический ток. Однако, при попадании света на ячейку, электрон в полупроводнике может стать проводящим. Разгоняясь в достаточно сильном электрическом поле, этот электрон «выбивает» другие электроны в проводящее состояние, новые электроны также разгоняются, и так далее — этот процесс называется лавинной ударной ионизацией. На границе слоя гашения при этом накапливается заряд, который экранирует поле в области умножения, и лавина затухает.

Изготовление опытного образца ТФУ — сложный и дорогостоящий технологический процесс, а непосредственное численное моделирование электрофизики многоячейкового прибора затруднено из-за ограничений по вычислительной мощности, поэтому полезно заранее оценивать характеристики сконструированного прибора. Для упрощения расчетов разработана модель эквивалентной электрической схемы ТФУ, состоящая из линейных компонентов (резисторы, емкости, индуктивности) — приближенно описывающая компоненты реального детектора.

Рассмотрим эквивалентную электрическую схему ТФУ, подключенную к источнику питания и измерительному устройству.

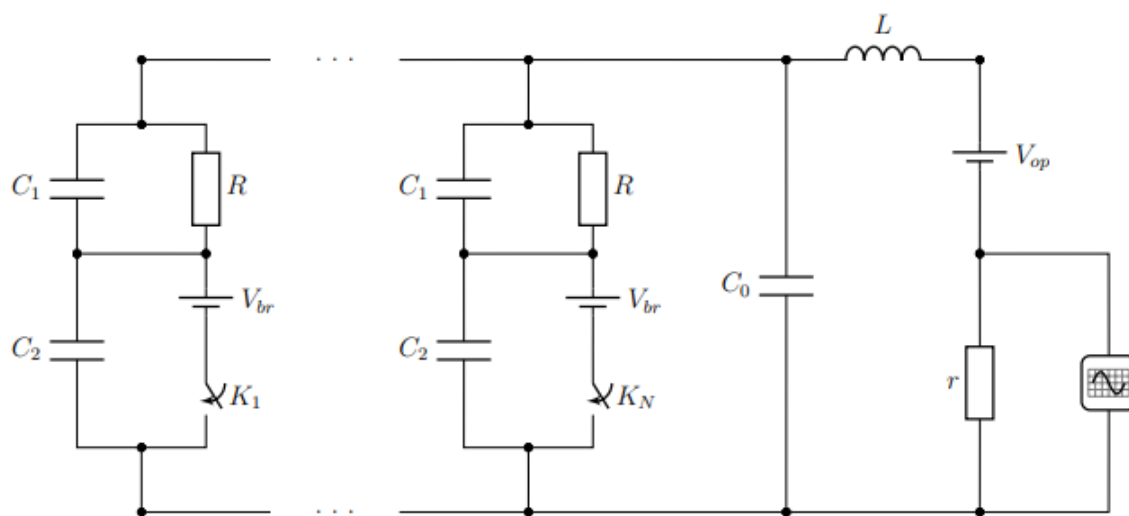


Рис.1: Эквивалентная схема ТФУ в составе схемы считывания

Опишем компоненты эквивалентной схемы и допускаемые приближения:

- В левой части схемы расположена матрица ТФУ, состоящая из $N = 5 \cdot 10^4$ параллельно соединенных ячеек и паразитной (межячеечной) емкости C_0 . Каждая ячейка упрощенно представляет из себя последовательное соединение p - n перехода и слоя гашения.
- p - n переход в диапазоне прикладываемых к нему напряжений в обратном смещении $[V_{br}, V_{op}]$ можно аппроксимировать постоянной емкостью C_2 .
- Лавинный процесс приводит к тому, что напряжение на p - n переходе мгновенно падает до напряжения пробоя V_{br} . Время этого процесса много меньше характерных времен всех остальных процессов в цепи. С точки зрения нашей цепи лавинный процесс при попадании света на ячейку с номером i представляет собой кратковременное замыкание ключа K_i и мгновенное падение напряжения на p - n переходе до $V_{br} = 63$ В. Все остальное время ключи K_i разомкнуты.
- Слой гашения обладает постоянной емкостью C_1 и сопротивлением утечки $R = 100$ МОм.
- Паразитная индуктивность ножек детектора и соединительных элементов — $L = 1$ нГн.

- ТФУ последовательно соединен с источником постоянного рабочего напряжения $V_{op} = 65$ В.
- Измерительное устройство эквивалентно нагрузке сопротивлением $r = 50$ Ом и идеальному вольтметру (осциллографу).

Для удобства вычислений введем дополнительные обозначения:

- $C_{cell} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ — емкость одной ячейки
- $C_{det} = N C_{cell} + C_0 = 20$ пФ — емкость детектора
- $k = C_1 / C_2 = 5$ — отношение емкостей слоя гашения и $p - n$ перехода
- $p = C_0 / C_{det} = 0.1$ — отношение паразитной емкости к емкости детектора
- $V_{ov} = V_{op} - V_{br} = 2$ В — величина перенапряжения на приборе.

Часть А. Лавинный процесс (2.5 балла)

Пусть схема находится в установившемся режиме, то есть на нее в течении очень большого времени не попадало световых импульсов и ключи K были разомкнутыми.

A1 Для установившегося режима найдите:

0.4

- напряжение V_r на нагрузке r ;
- напряжение V_0 на каждой ячейке и паразитной емкости C_0 ;
- напряжения V_1 на слоях гашения каждой ячейки.

В условиях установившегося режима свет попадает одновременно на n ячеек. Рассмотрим состояние схемы через настолько малое время после попадания света, что зарядом, протекшим через индуктивность можно пренебречь. Также можно пренебречь и протеканием заряда через сопротивления утечки R . Пусть ΔV — изменение напряжения на конденсаторе C_0 и на ячейках по завершении лавинного процесса. Полярность изменения напряжения примите той же, что и полярность напряжения в установившемся режиме.

A2 Найдите:

0.8

- изменение заряда Δq_0 конденсатора C_0 . Ответ выразите через C_0 и ΔV ;
- изменения зарядов Δq_{1a} и Δq_{2a} конденсаторов C_1 и C_2 соответственно каждой из активных ячеек. Ответы выразите через C_1 , C_2 , V_{ov} и ΔV ;
- изменения зарядов Δq_{1p} и Δq_{2p} конденсаторов C_1 и C_2 соответственно каждой из пассивных ячеек. Ответы выразите через C_{cell} и ΔV .

A3 Найдите изменение напряжения ΔV на ячейках и конденсаторе C_0 по завершении лавинного процесса . **0.7**
 Ответ выразите в общем виде через V_{ov} , n , N , C_1 , C_2 , C_0 .

Из-за тепловых флуктуаций на нагрузке может возникать шумовой сигнал, амплитуду которого можно оценить по формуле $V_{noise} = \sqrt{4k_B T r f}$, где $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, T — температура нагрузки (в Кельвинах), r — сопротивление нагрузки, f — частотная полоса пропускания измерительного прибора (осциллографа).

A4 Оцените амплитуду теплового шума на нагрузке $r = 50$ Ом при комнатной температуре, если полоса пропускания осциллографа составляет $1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$. Используя данные из условия задачи и полученную вами формулу из **A3** найдите численное значение ΔV при попадании света на одну ячейку. Сделайте вывод о том, можно ли различить сигнал от одной ячейки на фоне теплового шума сопротивления нагрузки. **0.6**

Часть В. Коэффициент умножения (0.8 балла)

Одной из важных характеристик ТФУ является коэффициент умножения M :

$$M = \frac{Q}{e},$$

где Q — заряд, протекающий через нагрузку r после попадания света на **одну** из ячеек за очень большое время, за которое цепь успевает полностью вернуться в установившийся режим. Изначально цепь также находилась в условиях установившегося режима. Здесь $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд.

- В1** Найдите коэффициент умножения M для ТФУ с параметрами из условия задачи. Выразите ответ через N , C_1 , C_2 , C_0 , e , V_{ov} и приведите численное значение. **0.8**

Часть С. Импульс фотосвета (1.2 балла)

- С1** Рассмотрим импульс, регистрируемый осциллографом после попадания света на одну ячейку. Будем считать, что длительность импульса достаточно мала, чтобы пренебречь током, протекающим через сопротивление утечки R , но достаточно большое, чтобы лавинный процесс завершился, и все ключи K_i разомкнуты. В этом приближении можно заменить цепь на эквивалентную последовательную RLC цепь. Укажите ее параметры. **0.4**

- С2** Оцените добротность полученной RLC цепи. Возникнут ли в этой цепи колебания? **0.3**

- С3** Качественно изобразите график зависимости напряжения на нагрузке от времени после попадания света на одну из ячеек. Первоначально схема находилась в установившемся режиме. Характерные значения указывать не обязательно. **0.3**

- С4** Сравните максимальное по модулю значение напряжения на нагрузке $|V_{max}|$ после попадания света на одну из ячеек и найденную ранее величину $|\Delta V|$. Какая из этих величин больше? Обведите в листе ответов правильное соотношение. **0.2**

Часть D. Восстановление ячеек (1.5 балла)

- D1** Найдите приближенную зависимость напряжения на слое гашения ячейки от времени после попадания света на нее (в первоначальных условиях установившегося режима). Воспользуйтесь тем, что в условиях данной задачи $\Delta V \ll V_{ov}$, $R \gg r$. Считайте, что прошло достаточно много времени, и напряжение на внешней нагрузке практически равно нулю. Выразите ответ через V_{ov} , R , C_1 , C_2 , t . **1.0**

- D2** Найдите изменение напряжения ΔV на конденсаторе C_0 при попадании света на одну ($n = 1$) из *невосстановленных* ячеек, напряжение на слое гашения которой равнялось $V_1 < V_{ov}$. Считайте, что до попадания света на эту ячейку напряжение на всех ячейках и паразитной емкости соответствовало установившемуся режиму. Выразите ΔV через V_{ov} , V_1 , N , C_1 , C_2 , C_0 . **0.5**

Часть Е. Шум фотодетектора (2.0 балла)

Основная причина, затрудняющая достоверную регистрацию полезного сигнала в системах активного лазерного сканирования — это шумовой сигнал от фоновой засветки (рассеянный от объекта солнечный свет, свет фар встречных автомобилей и т. д.). В этом разделе задачи проанализируем характеристики сигнала под воздействием равномерной фоновой засветки детектора.

Пусть фоновая засветка имеет такую интенсивность, что вероятность срабатывания каждой ячейки за время dt равна dt/T и не зависит от времени до предыдущего срабатывания. T — характерный промежуток времени между срабатываниями ячейки. Примем за 1 амплитуду импульса фотоответа (то есть максимальное значение сигнала на осциллографе) при попадании света на полностью восстановленную ячейку. Если ячейка восстановилась не полностью, амплитуда импульса фотоответа зависит от времени t , прошедшего с момента предыдущего срабатывания ячейки, как (τ — характерное время восстановления ячейки)

$$V = 1 - e^{-t/\tau}.$$

E1 Пусть $p(t)$ — вероятность того, что в течение времени t ячейка не сработала ни разу. Найдите $p(t + dt)$, **0.3**
выразите ответ через $p(t)$, dt , T . Считайте, что $dt \ll T$.

E2 Найдите вероятность того, ячейка не сработает ни разу в течение времени t . Ответ выразите через t , T . **0.2**

E3 Пусть ячейка сработала в момент времени $t = 0$. Найдите вероятность того, что в следующий раз она **0.2**
сработает в интервал времен от t до $t + dt$.

E4 Найдите среднюю амплитуду импульсов фотоответа μ . Считайте, что разные ячейки создают импульсы **0.4**
независимо друг от друга.

E5 Найдите среднеквадратичное отклонение амплитуды импульсов фотоответа σ . Ответ выразите через τ , T . **0.6**
Указание: среднеквадратичное отклонение можно вычислить по формуле $\sigma = \sqrt{\mu(V^2) - \mu^2(V)}$, где $\mu(V^2)$ — среднее значение квадрата амплитуды, $\mu^2(V)$ — квадрат среднего значения амплитуды.

Введём понятие соотношения сигнал-шум (SNR , англ. signal-to-noise ratio), как отношение средней величины сигнала к его среднеквадратичному отклонению:

$$SNR = \frac{\mu}{\sigma}$$

По величине SNR можно косвенно судить о динамическом диапазоне и чувствительности детектора: чем больше SNR , тем лучше эти характеристики.

E6 Найдите SNR амплитуд импульсов фотоответа под воздействием равномерной фоновой засветки в слу- **0.3**
чаях:

- $\tau = 0$;
- $\tau \gg T$;
- $\tau = T$.