

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ И ПРОЕКТ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ГЛУБОКОВОДНОМУ ДЕТЕКТИРОВАНИЮ МЮОНОВ И НЕЙТРИНО (ПРОЕКТ ДЮМАНД)

И.М. Железных*), А.Ф. Плотников, З.Я. Садыгов*), В.Э. Шубин

УДК 621.383.4

Рассмотрены основные требования, предъявляемые к фотоприемникам оптического варианта проекта ДЮМАНД, и возможность использования лавинных МДП-фотоприемников в этом проекте.

В последние годы широко обсуждается оптический вариант глубоководного (на глубине 5 км вблизи Гавайских островов) детектора мюонов и нейтрино объемом 10^8 м^3 с фотоэлектронными умножителями в качестве детектирующих черенковский свет элементов /1/.

В условиях проекта ДЮМАНД преимущество полупроводниковых фотоприемников очевидно: они обладают высокой квантовой эффективностью ($\approx 80\%$) и могут выдерживать высокие давления. Использование в глубоководных условиях полупроводниковой электроники, способной выдерживать высокие давления, могло бы значительно уменьшить стоимость проекта ДЮМАНД, а главное, упростить установку. В проекте ДЮМАНД требуется регистрировать потоки ~ 200 фотонов с длинами волн $400 \div 600 \text{ нм}$, падающих на 1 м^2 за время $\sim 10 \text{ нс}$. Поскольку высокочувствительные полупроводниковые фотоприемники имеют малые площади, то необходимо создание систем для сбора света. Если в качестве светособирающей системы использовать световоды из пластика или стекла с люминесцентными добавками, то поток регистрируемого излучения, падающего на фотоприемник, можно значительно увеличить. Пусть на фотоприемник падает $10 \div 20$ фотонов. Так как за счет стокового сдвига ($\sim 100 \text{ нм}$) длины волны сместятся в область $500 - 700 \text{ нм}$, то необходимо регистрировать импульсы света мощностью $(3 \div 6) \cdot 10^{-10} \text{ Вт}$ при полосе регистрации $\Delta \nu \sim 100 \text{ МГц} / 1/$. Минимальный различимый сигнал (MDS) в фотоприемном устройстве определяется выражением /2/

$$\text{MDS} = \sqrt{\bar{B}} \sqrt{(\text{NEP})^2 + (\text{TEP})^2 \text{ В}},$$

*) Институт ядерных исследований АН СССР.

где NEP характеризует внутренние шумы фотоприемника и равен минимальной мощности сигнала, необходимой для получения равного единице отношения сигнал/шум, если шум нормирован на единицу ширины полосы регистрации; аналогичная характеристика для теплового шума определяется выражением:

$$TEP = 2E_{\phi} \sqrt{KTC} / e q M,$$

где E_{ϕ} - энергия регистрируемого фотона, ϵ - квантовый выход, q - заряд электрона, C - емкость фотоприемника, M - коэффициент усиления фототока. При $NEP = 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2}, $M \approx 300$, $T = 300$ °С, $C = 10$ пФ, $\epsilon = 0,8$, $V \approx 100$ МГц имеем $MDS \approx 3 \cdot 10^{-10}$ Вт.

Таким образом, полупроводниковые фотоприемники с $NEP \sim 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2} и коэффициентом усиления $M \sim 10^3$ могут детектировать порядка десяти фотонов видимого света при $V \sim 100$ МГц.

В настоящее время производятся лавинные кремниевые фотодиоды со следующими параметрами /3/: быстродействие - единицы наносекунд, величина квантового выхода в максимуме спектральной чувствительности - до 80%, пороговая чувствительность $\sim 5 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2}, коэффициент усиления фототока $M \approx 50 \div 100$, чувствительная площадь < 1 мм².

Дальнейшее увеличение M в лавинных фотодиодах приводит к резкому ухудшению отношения сигнал/шум. Чувствительная площадь указанных фотоприемников ограничивается присутствием микроплазменного пробоя на границе раздела p-n перехода /4/. В то же время для проекта ДЮМАНД требуется иметь фотоприемники с улучшенными примерно на порядок пороговой чувствительностью и усилением фототока (и, конечно, большей площади).

В Физическом институте им. П.Н. Лебедева совместно с Институтом ядерных исследований АН СССР разрабатывается новый тип фотоприемников большой площади на основе МДП-структур (металл-диэлектрик-полупроводник). Лавинный МДП-фотоприемник (ЛМДПФ) обладает целым рядом уникальных параметров и характеристик, которые позволяют рассматривать его как один из перспективных вариантов для использования в проекте ДЮМАНД.

Лавинный МДП-фотоприемник состоит из полупроводниковой подложки (Si), нанесенных на нее слоев диэлектрика (SiO₂) и прозрачного для света проводника (Au или Ni). Электрические контакты осуществляются к проводящему слою и к полупроводниковой подложке. Последовательно с МДП-структурой в электрическую цепь включается импульсный источник питания

и сопротивление нагрузки, с которого снимается сигнал.

Наличие диэлектрического слоя (~ 100 нм), расположенного между прозрачным для света металлическим контактом и полупроводником, приводит к двум следующим особенностям протекания лавинного процесса: во-первых, это - самостабилизация коэффициента умножения носителей заряда при линейно нарастающем напряжении питания, что связано с возникновением отрицательной обратной связи между коэффициентом умножения этого процесса и напряженностью электрического поля в полупроводнике: второе - резкое уменьшение вероятности появления микроплазменного пробоя поверхности полупроводника и выравнивание коэффициента умножения фототока по чувствительной поверхности фотоприемника. В результате в МДП-структуре удастся реализовать следующие параметры и характеристики: коэффициент умножения фототока $M \approx 3 \cdot 10^4$, рабочая площадь $S \approx 10$ мм², пороговая чувствительность $P_{th} \approx 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2} при длине волны излучателя ≈ 630 нм [5]. Если предположить белый характер шума, то при длительности $\tau = 10$ с пороговая регистрируемая световая мощность составит $\approx 10^{-10}$ Вт, что соответствует семи фотонам.

Для ЛМДПФ площадью 1 см² можно привести следующие оценки. Эффективная емкость в малосигнальном режиме составит $10^{-10} \div 10^{-11}$ пФ, что позволяет для регистрации импульсов длительностью $\sim 10^{-8}$ с использовать нагрузочное сопротивление $10^2 \div 10^3$ Ом. При этом, учитывая, что ампер-ваттная чувствительность может быть доведена до значения 10^4 А/Вт, получим для величины сигнала на нагрузочном сопротивлении $R_n \approx 10^3$ Ом, соответствующего пороговой мощности порядка 10^{-10} Вт, значение 1 мВ.

Тепловой шум нагрузочного сопротивления составит при этом 12 мкВ, что позволяет использовать для регистрации фотосигнала стандартный усилитель. В этом рассмотрении не учитывались два обстоятельства: во-первых, существуют избыточные лавинные шумы, которые в настоящее время не позволяют на приемнике большой площади (~ 1 см²) реализовать данную пороговую чувствительность. Решить эту проблему можно, снижая избыточные шумы за счет повышения уровня технологии фотоприемников на основе глубоких исследований физических процессов в МДП-структурах. Во-вторых, описанный фотоприемник требует импульсного питания, т.е. существует некоторое "мертвое время", когда регистрация не ведется. Для непрерывной регистрации необходимо либо организовать систему из нескольких фотоприемников, работающих в сдвинутые друг относительно друга интервалы времени и имеющих объединенный выход, либо использовать специальные конструкции лавинных МДП-фотоприемников.

Таким образом, несмотря на вышеуказанные трудности, лавинные МДП-

фотоприемники могут оказаться высокочувствительными детекторами, наиболее адекватными проблеме регистрации слабых световых импульсов в условиях проекта ДЮМАНД.

Авторы выражают глубокую благодарность М.А. Маркову за стимулирующие обсуждения.

Поступила в редакцию 5 ноября 1983 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. Neutrino-81, Hawaii, 1981.
2. М. Росс, Лазерные фотоприемники, "Мир", М., 1969 г., с. 170.
3. А.Я. Вуль, Зарубежная радиоэлектроника, № 9, 87 (1979).
4. С.М. Зи, Физика полупроводниковых приборов "Мир", М., 1973 г., с. 200.
5. А.Б. Кравченко, А.Ф. Плотников, В.Э. Шубин, Квантовая электроника, 5, 1918 (1978).