

Лавинные фотодиоды компании АО «Оптрон»

Алина ЖАРКОВА,
a.zharkova@optron.ru,
Василий БОРИЧОК,
v.borichok@optron.ru,
Владислав АТЮНИН,
v.atyunin@optron.ru

В статье рассматриваются лавинные фотодиоды от АО «Оптрон». Кратко описываются особенности диодов этого типа, и приводятся основные сведения о продукции компании.

О компании АО «Оптрон»

Поскольку компания АО «Оптрон» впервые появляется на страницах журнала «Электронные компоненты», мы приведем некоторые основные сведения о ней. Начало истории АО «Оптрон» относится к далекому 1928 г. С тех пор предприятие пережило немало трансформаций. В настоящее время АО «Оптрон» входит в состав Госкорпорации «Ростех» и находится в числе лидеров среди отечественных компаний, выпускающих полупроводниковую электронику.

Компания специализируется на разработке и производстве эпитаксиальных структур в спектральном диапазоне от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного диапазона, занимается разработкой и выпуском электронной компонентной базы широкого применения на этих материалах.

Специалисты компании получили статус лидеров «Ростеха». В 2024 г. АО «Оптрон» вывело на рынок фотоники отечественные лавинные фотодиоды (ЛФД) (avalanche photodiodes), не уступающие мировым аналогам. Эти приборы применяются в дальнометрии, для оптической связи и регистрации слабых оптических сигналов, за что удостоились награды «Технологический прорыв» в номинации АО «ОПК».

О лавинных фотодиодах

Лавинные фотодиоды широко используются в системах, требующих высокой чувствительности к слабым оптическим сигналам. Кремниевые (Si) ЛФД эффективны в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах (400–1100 нм) и применяются в лидарах, медицинской диагностике (например, в оптической томографии), а также

в системах квантовой криптографии. Благодаря высокой квантовой эффективности в видимом диапазоне они также востребованы в спектроскопии и системах низкоуровневого детектирования.

ЛФД на основе арсенида галлия–индия (InGaAs) работают в ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах (900–1700 нм), что делает их ключевыми компонентами в волоконно-оптической связи (особенно в системах с длинами волн 1310 и 1550 нм), телекоммуникациях и в системах ночного видения. Они также востребованы в спектральном анализе и системах дистанционного зондирования, где необходима высокая чувствительность в ИК-области.

По сравнению с традиционными фотодиодами, которые широко применяются и давно известны, ЛФД менее известны. По этой причине перед тем, как перейти к описанию продукции компании АО «Оптрон», мы кратко опишем особенности ЛФД. Их структура схематично показана на рис. 1. Структура традиционного фотодиода имеет вид p^+-i-p^+ . Структура ЛФД, в который добавлен слой p , выглядит как $p^+-i-p-p^+$.

Легирующие примеси распределяются так, чтобы в области i напряженность электрического поля была невелика и практически неизменна, в то время как в p -области поле резко изменяется и достигает значения, при котором возникает лавинное размножение носителей. При попадании света в область i образуются электронно-дырочные пары. Под воздействием поля в области i носители движутся в соответствующем направлении. Попадая в p -область, электроны ускоряются и приобретают энергию, которая позволяет выбить другие электроны из валентной зоны атомов в зону проводимости. Таким образом, происходит умножение первичного фототока (рис. 2).

Максимальное усиление ЛФД достигается, когда внешнее напряжение смещения приближается к напряжению пробоя. Если смещение

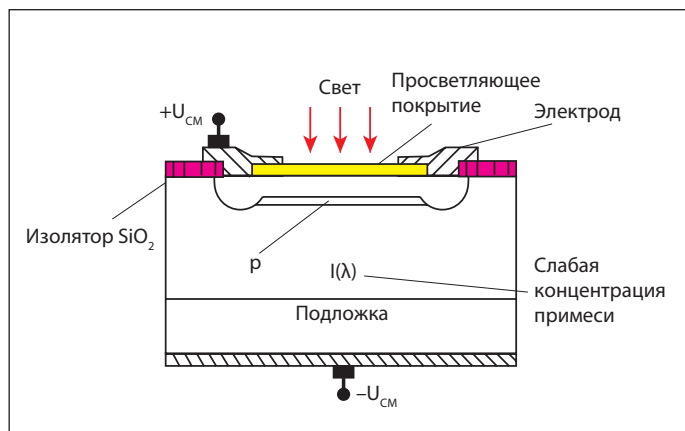


Рис. 1. Структура лавинного фотодиода

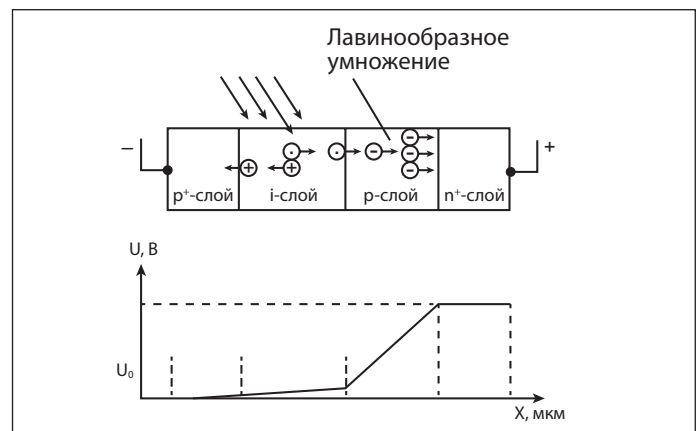


Рис. 2. Процесс умножения первичного фототока

Таблица 1. Основные параметры ЛФД

Наименование ЛФД	Спектральный диапазон λ, мкм	Длина волны пика относительной спектральной характеристики чувствительности λ, мкм	Напряжение пробоя U _{проб.} , В	Коэффициент умножения М, отн. ед.	Темновой ток I _д , нА	Ампер-ваттная чувствительность S, А/Вт	Ширина полосы пропускания Δf, ГГц	Емкость С, пФ
ИФДЛ01А	0,9–1,7	1,55	42 (I _{проб.} = 10 мкА)	29 (U _{проб.} = –1 В, P = 1 мкВт)	4 (M = 10)	0,77 (λ = 1,55 мкм)	0,7	2,6 (U _{смещ.} = –34 В, f = 1 МГц)
КФДЛ01А	0,4–1,1	0,84	170 (I _{проб.} = 10 мкА)	12 (0,9U _{проб.} , P = 1 мкВт)	1 (M = 10)	0,5 (λ = 0,905 мкм)	0,6	1,6 (U _{смещ.} = –120 В, f = 1 МГц)

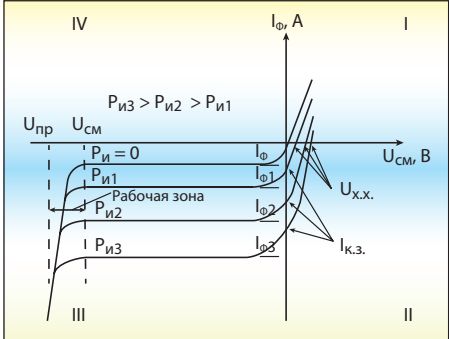


Рис. 3. Вольтамперная характеристика ЛФД

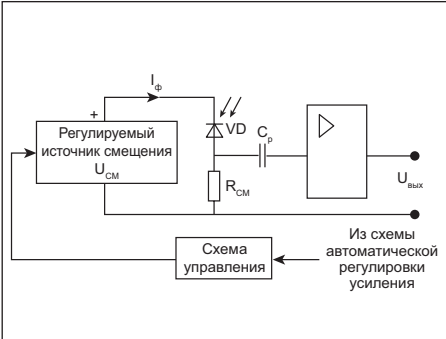


Рис. 4. Функциональная электрическая схема включения ЛФД

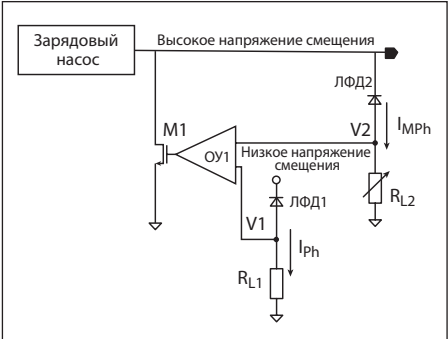


Рис. 5. Электрическая схема включения ЛФД с регулированием коэффициента умножения

превысит пробивное напряжение, произойдет пробой, при котором ток через ЛФД практически не зависит от концентрации носителей, возникших под воздействием светового потока. Вольтамперная характеристика ЛФД показана на рис. 3.

Умножающий коэффициент М определяется из следующего соотношения:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_{CM}}{V_{PP}} \right)^m},$$

где: V_{CM} – напряжение внешнего обратного смещения; V_{PP} – напряжение электрического пробоя; m – параметр, зависящий от материала фотодиода: например, у кремния m = 1,54.

Функциональная электрическая схема включения ЛФД довольно проста (рис. 4). В отличие от обычного фотодиода, ЛФД требует источник смещения с повышенным напряжением и схема регулирования коэффициента умножения М. Регулирование этого коэффициента осуществляется путем изменения внешнего напряжения смещения.

Простой пример электрической схемы с регулированием коэффициента умножения приведен на рис. 5. В схеме используются два идентичных ЛФД. На каждый из них попадает одинаковый световой поток. На ЛФД 2 подано высокое напряжение смещения, и он работает в режиме умножения. На ЛФД 1 подано низкое напряжение смещения, и его коэффициент умножения М равен 1. Если ток ЛФД 2 увеличивается, напряжение V2 повышается и становится больше, чем напряжение V1. При этом на выходе операционного усилителя появляется положительное напряжение, транзистор М1 начинает открываться и «подсаживает» выход зарядового насоса. Соответственно, уменьшается напряжение на ЛФД 2 и его коэффициент умножения.

О лавинных фотодиодах компании АО «Оptron»

В производственную линейку компании АО «Оptron» входят ЛФД двух видов – ИФДЛ01А и КФДЛ01А. Они разработаны в рамках инновационной программы «Гермес». ЛФД ИФДЛ01А производится на основе InGaAs, а КФДЛ01А – на основе кремния. Оба диода выпуска-

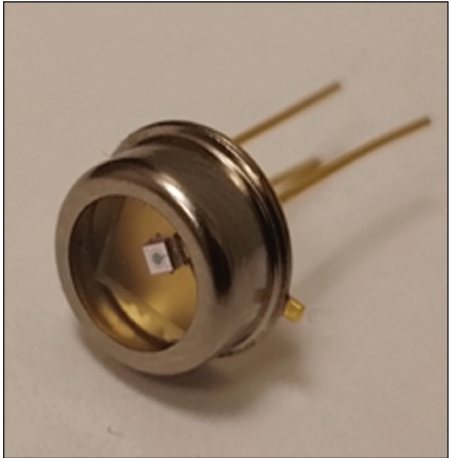


Рис. 6. Лавинные фотодиоды компании АО «Оptron»

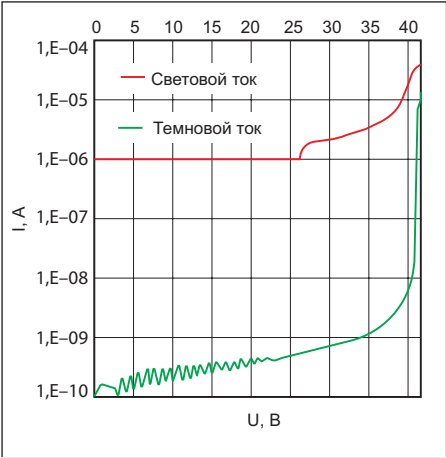


Рис. 7. Вольтамперная характеристика ИФДЛ01А

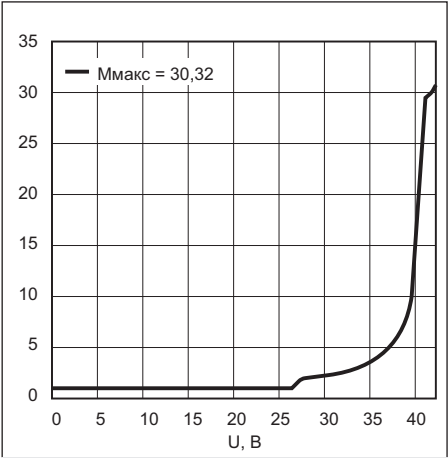


Рис. 8. Зависимость коэффициента умножения ИФДЛ01А от внешнего напряжения смещения

Таблица 2. Сравнительные параметры КФДЛ01А и аналогов производства компании Hamamatsu Photonics

Размер фоточувствительной площадки, мкм	Модель	спектральный диапазон, нм	Параметры					
			Uпр, В		М		It, нА	
			тип.	макс.	тип.	макс.	тип.	макс.
500	КФДЛ01А	400–1000	160	175	110	–	–	1
	S12023-05		150	200	100	–	–	1
	S12051							

Таблица 3. Сравнительные параметры ИФДЛ01А и аналогов производства компании Hamamatsu Photonics

Размер фоточувствительной площадки, мкм	Модель	спектральный диапазон, нм	Параметры					
			Uпр, В		М		It, нА	
			тип.	макс.	тип.	макс.	тип.	макс.
200	ИФДЛ01А	900–1700	40	50	25	–	–	5
	G8931-04		55	60	30	–	40	65
	G8931-10						90	140

каются в корпусе ТО-5 с фоточувствительной площадкой диаметром 0,5 мм. Внешний вид ЛФД показан на рис. 6. Основные параметры ЛФД представлены в табл. 1.

Кремниевый диод КФДЛ01А имеет эпитаксиальную структуру с управляемой легированностью, обеспечивающей равномерное лавинное умножение. К числу его преимуществ относятся следующие:

- высокий квантовый выход до 90% в видимом диапазоне;
- низкий уровень шумов за счет оптимизации р-п-перехода;
- возможность работы в режиме счета фотонов (Single-Photon Avalanche Diodes, SPAD).

Кремниевый КФДЛ01 А применяется в датчиках для систем автоматического управления, в том числе в робототехнике и БПЛА.

InGaAs ИФДЛ01А состоит из многослойных InGaAs/InP-гетероструктур, что позволяет снизить темновой ток и повысить быстродействие. В них внедрена технология криогенного охлаждения для работы в длинноволновом ИК-диапазоне до 2,6 мкм. У ИФДЛ01А – следующие основные преимущества:

- чувствительность к лазерному излучению, используемому в оптоволоконной связи (1550 нм);
- возможность детектирования слабых сигналов в условиях зашумленности (например, в квантовых коммуникациях).

Перечислим основные области применения ИФДЛ01А:

- волоконно-оптические линии передачи данных (5G, интернет вещей);
- системы ночного видения и тепловизионного мониторинга;
- квантовые компьютеры и системы распределения ключей (QKD).

Поскольку все необходимые зависимости в графическом виде показаны в документации АО «Оptron», для предварительного ознакомления мы приведем только две из них: вольтамперную характеристику ИФДЛ01А (рис. 7) и зависимость коэффициента умножения ИФДЛ01А от внешнего напряжения смещения (рис. 8). Аналогичные характеристики КФДЛ01А имеют примерно такой же вид, но характеризуются другими численными значениями (см. табл. 1)

ЛФД АО «Оptron» ни в чем не уступают зарубежным аналогам. В табл. 2–3 приведены результаты сравнения ЛФД АО «Оptron» и аналогов производства известной японской компании Hamamatsu Photonics.

Технология производства ЛФД сложна: следует обеспечить равномерное умножение носителей по всей светочувствительной площади ЛФД и предотвратить утечку по краям перехода. При разработке ЛФД компании пришлось решить в том числе следующий ряд сложных задач:

1. Обеспечить чистоту материала для минимизации дефектов кристаллической решетки за счет использования молекулярно-лучевой эпитаксии (MBE).
2. Теплоотвод: разработаны чипы с алмазными подложками для эффективного рассеивания тепла.
3. Надежность: использована пассивация поверхности для защиты от влаги и окисления.

Продукция АО «Оptron» уже применяется в трансиверах для магистральных систем связей, в лидарах для беспилотных систем и совместно с ведущими НИИ России в экспериментах по квантовой запутанности.

события рынка

НИИМЭ представил комплексную аналитическую программу развития микроэлектроники до 2036 г.

НИИ молекулярной электроники (входит в ГК «Элемент»), являющийся резидентом ОЭЗ «Технополис Москва», представил комплексные аналитические программы, разработанные по поручению Минпромторга, в том числе по микроэлектронике, фотонике, СВЧ-электронике, пассивной, силовой и перспективной электронике.

Программа базируется на прогнозных данных и опросах участников рынка о требованиях к будущим ключевым электронным системам по выделенным отраслям. На основании этой информации было получено представление, какие виды ЭКБ и технологии станут востребованы в ближайшее

время, что позволило понять и то, какое технологическое оборудование и материалы еще нужно разработать и какую инфраструктуру построить. Комплексность программы в том, что она описывает направления развития для сквозного создания современной электронной продукции. Разработанный документ не охватывает весь рынок аппаратуры, производимой в России, но показывает ключевые направления, важные для развития собственного производства.

<https://russianelectronics.ru/>