

УДК 621.383

Ультрафиолетовый фотоприемник для спектрального диапазона 0,19–0,28 мкм на природном алмазе типа 2а

А. А. Алтухов, В. В. Ерёмин, В. А. Киреев, А. В. Митёнкин
 ЗАО "УралАлмазИнвест", Москва, Россия

Получены одноэлементные фотоприемники с уровнем фотоэлектрических параметров, близким к расчетному, для спектрального диапазона 0,19–0,28 мкм. Чувствительность к видимому свету отсутствует. При падении на фотоприемник прямых солнечных лучей, создающих энергетическую облученность более $1 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², наблюдается фотоответ, обусловленный, по-видимому, активацией локальных центров в запрещенной зоне алмаза. Порог чувствительности по направлению на Солнце не ниже $P_r = 1,3 \cdot 10^{-5}$ Вт/Гц^{1/2}. В спектральном диапазоне 0,19–0,28 мкм при $\lambda_{max} = 0,225$ мкм порог чувствительности близок к расчетному $P_r = (1-2) \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2}. В корпусе фотоприемника, в так называемой "холодной зоне", размещен операционный усилитель с коэффициентом усиления $K = 100$. Дополнительного охлаждения фотоприемник не требует. Рассмотрены физические принципы фотоприема на природном алмазе и перспективы развития многоэлементных алмазных фотоприемников.

Спектральная характеристика природного алмаза типа 2а

Чувствительность монокристаллов природного алмаза к УФ-излучению известна довольно давно. Начало исследований электронных и оптических явлений в алмазе относится к 20-м годам прошлого века. Алмазы были поделены на две основные группы: первая группа имеет значительное поглощение в длинноволновой области спектра от 8 до 33,3 мкм, что обусловлено присутствием примесного азота, и имеет условное название "нечистые" алмазы в современной классификации; вторая группа алмазов этого поглощения не имеет и является "чистой" с точки зрения концентрации содержания азота.

Обе группы имеют решеточное поглощение на длине волны 2–6 мкм. Алмазы типа 2а по азоту не должны превосходить $2 \cdot 10^{(17-18)}$ см⁻³. На таких алмазах можно изготавливать приборы электронной техники. Отбор алмазов проводится по интенсивности решеточного поглощения в ИК-области спектра на длине волны 2,9 мкм.

Спектральный диапазон УФ-излучения для длин волн, меньших 0,3 мкм ("жесткий" ультрафиолет), в настоящее время продолжает оставаться недостаточно изученным. Фотодиоды на основе GaP, GaP_x, Ga_xAs_{1-x} [1], кремния и некоторых других материалов, работая на длинах волн 0,28–0,19 мкм, на "хвостах" своих спектральных характеристик практически теряют фоточувствительность. Диоды на карбиде кремния SiC, например (JEC Series), по данным Boston Electronics Corporation, имеют максимум чувствительности на длине волны 0,28 мкм. Спектральная характеристика этих диодов находится в диапазоне 0,2–0,4 мкм и не позволяет существенно снизить фоновый сигнал от Солнца и других источников излучения "мягкого" А и В типов УФ-излучения. Солнечное излучение короче

0,28 мкм до поверхности Земли не доходит, и фотоприемники, работающие левее указанной границы, относятся к "солнечно-слепым".

Фотоприемник на алмазе типа 2а классифицируется как "солнечно-слепой". Его спектральная характеристика позволяет без существенного снижения квантового выхода детектировать электромагнитное излучение вплоть до 0,1 нм ("мягкий" рентген). Кроме того, используя алмаз как ионизационную камеру, можно регистрировать разрядные токи от α -, β - и γ -излучений. Алмазные датчики ионизирующих излучений (радиометры и спектрометры) производятся серийно, в том числе и в ЗАО "УралАлмазИнвест".

На рис. 1 (BOLD, Европейский консорциум) представлена относительная спектральная характеристика алмазного фотоприемника. Для сравнения показана спектральная характеристика кремниевого детектора в длинах волн от 0,1 до 1000 нм.

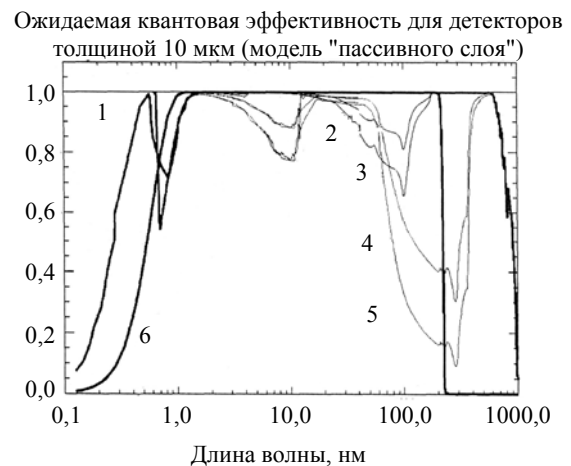


Рис. 1. Квантовая эффективность алмазных ФПУ (BOLD, Европейский консорциум):

1 — кремниевый детектор без какого-либо пассивного слоя; 2 — алмазный детектор с пассивным слоем 0,5 нм; 3 — алмазный детектор с пассивным слоем 1,0 нм; 4 — кремниевый детектор с пассивным слоем 5,0 нм; 5 — кремниевый детектор с пассивным слоем 10,0 нм; 6 — алмазный детектор без какого-либо пассивного слоя

УФ-излучение короче 0,28 мкм достаточно сильно по сравнению с видимым излучением поглощается озоновым слоем атмосферы. На длине волны 0,2 мкм воздух полностью становится непрозрачным и УФ-излучение может распространяться только в вакууме. Кроме того, входные окна фотоприемников, колбы излучающих жесткий ультрафиолет дейтериевых ламп не пропускают излучение короче 0,16 мкм. Поэтому спектральная характеристика алмаза ограничивается слева. Вид относительной спектральной характеристики фотоприемника на алмазе 2а представлен на рис. 2.

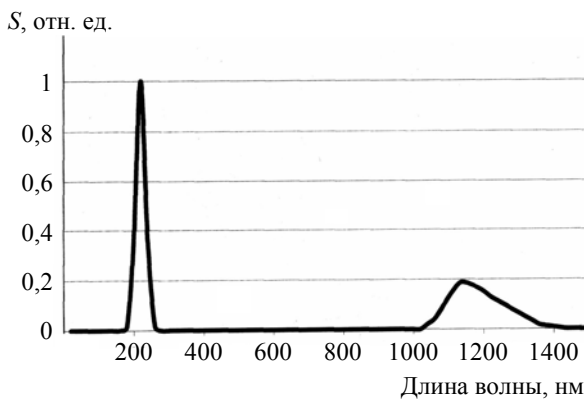


Рис. 2. Относительная спектральная характеристика фотоприемника на алмазе типа 2а

Видно, что максимальная чувствительность приходится на длину волны $\lambda_{\max} = \frac{1,24}{E_g} = \frac{1,24}{5,5 \text{ эВ}} = 0,225 \text{ мкм}$, что соответствует собственной

фотопроводимости на переходах "зона—зона". В области примесной фотопроводимости незначительный пик fotocувствительности приходится на ИК-диапазон от 1 до 1,3 мкм. В алмазных кристаллах с пониженной концентрацией азота типа 2а, по-видимому, за чувствительность в ИК-диапазоне ответственны так называемые С-центры — одиночные замещающие атом азота парамагнитные центры, доноры с энергией ионизации $E_d = 1,0 \text{ эВ}$. Донорный электрон смещен в сторону одного из ближайших атомов углерода и занимает антисвязывающую орбиталь [2, 3].

Прохождение жесткого ультрафиолета диапазона 0,19—0,28 мкм через атмосферу

Диапазон привлекателен для решения многих задач оборонного назначения. Например, в ответ на развитие средств ПВО разработчики головок самонаведения ракет включают в них дополнительные "цвета" — в последние 10—15 лет это УФ-диапазон 0,25—0,35 мкм.

УФ-излучение в диапазоне 0,25—0,35 мкм генерирует факел двигателей летательных аппаратов (свободные радикалы ионизованного газового потока) (рис. 3).

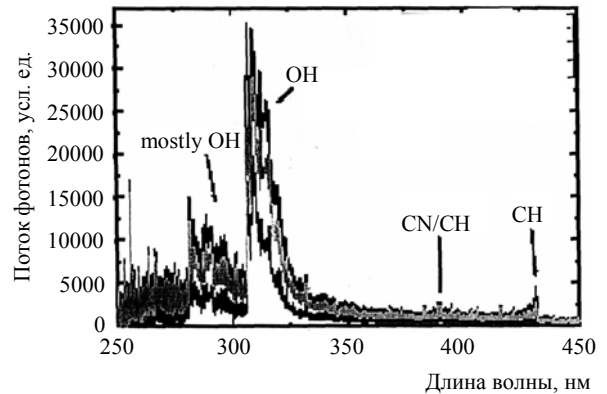


Рис. 3. Спектральная интенсивность излучения типичного реактивного топлива; данные GE (США) при температуре: — 3050 F; — 2570 F; --- 2810 F

На длине волны 0,32 мкм имеется пик излучения, по амплитуде превосходящий фоновый сигнал примерно в 70 раз. Но здесь велико влияние фонового солнечного излучения, подавляющего сигнал. Отсутствие фона можно получить на длинах волн менее 0,28 мкм. Максимум чувствительности алмазного фотоприемника находится на длине волны 0,225 мкм. Мощность УФ-излучения в этой области спектра примерно в 10^4 слабее излучения от Солнца и в 10^3 раз — излучения от факела топлива JP4 в видимом диапазоне при $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$ (рис. 4). На рис. 4 показана спектральная чувствительность ФПУ (SiC-фотодиод с p-n-переходом) и AlGaIn (фотодиод с барьером Шоттки). Данные — Boston Electronics и SVT Associates/Blue Lotus Micro Devices (США).

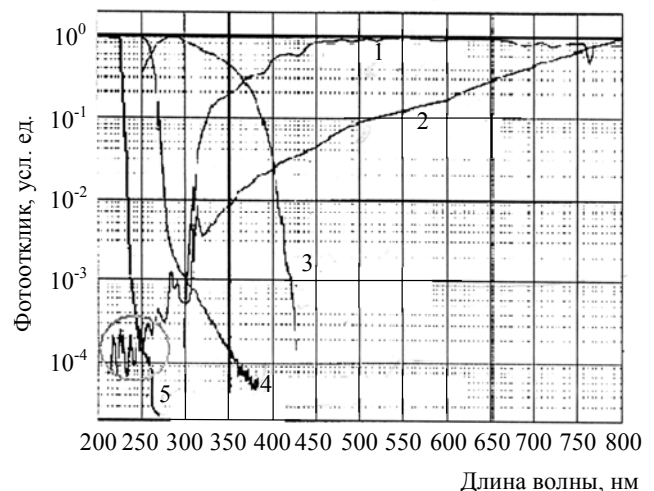


Рис. 4. Интенсивность солнечной радиации, проходящей через атмосферу и спектр факела топлива типа JP-4: 1 — солнечное излучение; 2 — эмиссия из пламени ракетного топлива для JP-4; 3 — фотодиод с p-n-переходом на базе SiC; 4 — диод Шоттки на 56% AlGaIn; 5 — алмаз

По данным Добсона, УФ-излучение поглощается атмосферой (рис. 5).

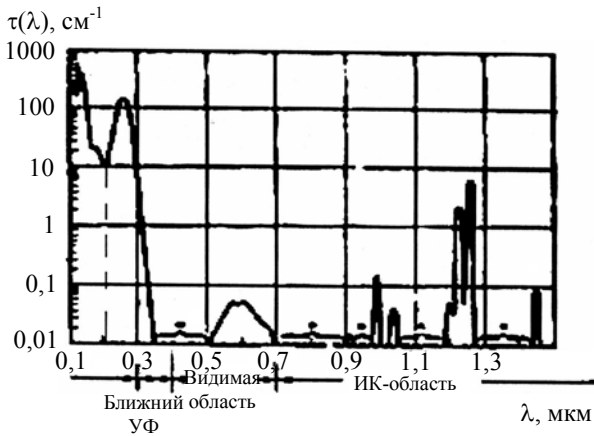


Рис. 5. Спектральные полосы поглощения озона и кислорода

Пунктирной линией обозначена $\lambda_{\max} = 0,225$ мкм, где развивается максимальная чувствительность фотоприемника на алмазе. Она приходится на минимум поглощения на высотах до 30 км. Граница "вакуумного ультрафиолета" определяется поглощением кислородом и озоном и не превышает 0,2 мкм. В нижних слоях атмосферы озона мало и он продолжает снижаться до высот 3 км.

УФ-излучение при $\lambda \geq 0,2$ мкм в основном поглощается озоном. Об этом говорят исследования "озоновых дыр". Там, где нет озона, УФ-излучение от Солнца проникает до поверхности Земли.

Интенсивность излучения от факела топлива JP4, сравнимая с мощностью солнечной радиации, равной $0,09$ Вт/см², в видимом спектре УФ-компонента составит не более $1 \cdot 10^{-4}$ части (см. рис. 4). Для излучателя — двигателя турбореактивного самолета "Боинг 707" тепловой мощностью 1,975 Вт/стер [4] эта величина становится еще меньше и, по расчетам, не превышает $1,975 \cdot 10^{-3}$ Вт/стер в диапазоне $\lambda = 0,2—0,25$ мкм. Если принять источник за точечный, то на расстоянии 3 км облученность составит $1,975 \cdot 10^{-3} / (3 \cdot 10^5)^2 \cong 2,2 \cdot 10^{-14}$ Вт/см². К тому же факел в видимом и УФ-диапазонах у самолета не выходит за срез сопла вплоть до форсированного режима. Наиболее эффективное обнаружение пламени можно получить от ракеты, переносного зенитно-ракетного комплекса (ПЗРК) и других источников открытого пламени.

Детектор УФ-излучения может быть использован как дополнительное средство, например к ИК-системе обнаружения. В ИК-спектре выхлопной хвост ракеты может достигать нескольких сотен метров. УФ-датчик фиксирует при приближении к ракете только источник пламени, и наведение будет очень точным.

Фоновое излучение в спектральном диапазоне 1—1,3 мкм от неба в дневное время состоит в основном из рассеянного солнечного излучения. Спектральная лучистость неба не превышает $7 \cdot 10^{-4}$ Вт/см²-стер-мкм и в основном находится в диапазонах UV-B и UV-A, видимом и ИК от 4 до 20 мкм.

Если приемник не направлен на такой мощный источник ИК-излучения, как Солнце, то невысокая чувст-

вительность алмаза в ИК-диапазоне практически не увеличивает фоновый сигнал от ИК-составляющей в спектральном диапазоне 1—1,3 мкм. Фотоприемник будет оставаться "солнечно-слепым".

При использовании же алмазного фотоприемника в качестве датчика пламени для пожарных оповещателей наличие чувствительности с $P_r = 1,3 \cdot 10^{-5}$ Вт/Гц^{1/2} в ИК-диапазоне может стать полезным.

Особенности изготовления и физика фотоприема детектора на природном алмазе типа 2а

Алмаз имеет ширину запрещенной зоны $E_g = 5,5$ эВ и является диэлектриком по определению. С другой стороны, алмаз — полупроводник, способный генерировать свободные носители тока (электроны и дырки). Электрическое сопротивление алмаза может колебаться в широких пределах — от 10^4 до 10^{16} Ом-см.

Фотоприемники на основе алмаза изготавливаются, как правило, из пластинок алмаза толщиной около 200 мкм, относящихся к группе 2а согласно градации алмазов по электрофизическим свойствам. Их сопротивление лежит в пределах $10^{10}—10^{16}$ Ом-см. Посторонних примесей в них практически нет, за исключением азота, который легко растворим в алмазе и является донорной примесью [2]. Допустимые концентрации азота, как показывает опыт работы, не должны превышать $2 \cdot 10^{19}$ атомов/см³. Алмазы группы 2а составляют не более 1—2 % от всех добываемых алмазов.

Фотоприемники с пониженным содержанием азота $\cong 10^{15}$ см⁻³ и относящиеся к группе 2б не исследовались, так как эта группа в отечественных алмазах отсутствует.

Низкие сопротивления характерны для наиболее "загрязненных" и дефектных кристаллов. Они выделены в группу 1а. Такие алмазы обладают фоточувствительностью, но имеют сопротивление $10^4—10^{10}$ Ом-см. Спектральная характеристика их более широкая, чем на алмазах группы 2а, вплоть до видимого диапазона длин волн, а максимум чувствительности смещен в длинноволновую сторону. Фоточувствительность слабая и по абсолютному значению составляет не более 10 % от максимума для группы 2а.

Сквозной ток через алмаз типа 2а мал (десятые доли пикоампера), и реализовать фоторезисторные принципы съема сигнала затруднительно. Более предпочтительными являются фотовольтаические приборы на алмазе, но для этого должен быть сформирован *p-n*-переход. Технологически отработано создание на алмазе только *p*⁺-области и диода Шоттки. Указанные структуры были изготовлены и исследованы на наличие фотоосвета на УФ-излучение. Схема включения фотоприемника приведена на рис. 6.

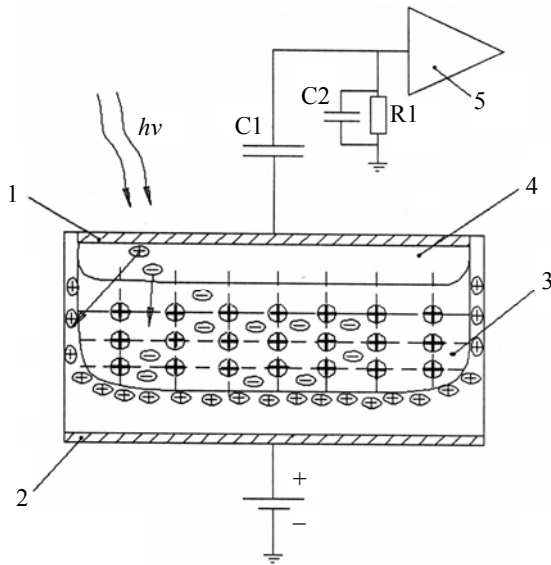


Рис. 6. Схема включения алмазной структуры и физика фотоприема

Через полупрозрачный контакт 1 из платины толщиной около 50 Å УФ-излучение генерирует в области пространственного заряда диода Шоттки 4 неравновесные носители, которые могут накапливаться в потенциальной яме 3 под платиновым электродом. Носители противоположного знака накапливаются в объеме алмаза. Потенциальная яма состоит из неподвижных ионов примеси и создается подачей внешнего смещения на электрод 2 подложки. Тип накапливаемых в потенциальной яме носителей определяется полярностью от источника смещения. Если на электрод 2 будет подан относительно "земли" положительный потенциал, то ушедшие через источник смещения электроны оставят нескомпенсированный объемный заряд донорной примеси. То же самое можно отнести и к структуре, у которой вместо платинового электрода выполнена ионным легированием p^+ -область в алмазе.

Получить потенциальную яму можно и без внешнего источника смещения, для чего подложку надо соединить коротко на "землю" и кратковременно подать на "плавающий" платиновый электрод 1 потенциал от любого источника заряда, например конденсатора. Алмаз легко поляризуется и "запоминает" полярность приложенного напряжения, 5. В объеме алмаза создается градиент поля и образуется нескомпенсированный объемный заряд — "потенциальная яма". Однако степень поляризации алмаза снижается со временем, и для восстановления потенциальной ямы требуется повторная подача потенциала на плавающий электрод.

Восстанавливать параметры потенциальной ямы по диодной схеме включения алмазной структуры, указанной на рис. 6, нет необходимости. Чем глубже яма и больше ее размер, тем больший заряд может быть в ней накоплен, тем выше фотосигнал.

Включение по диодной схеме не требует плавающего потенциала, и конденсаторы в этом случае не нужны. Для получения наибольшей чувствительности по напряжению сопротивление на входе операционного усилителя должно быть максимальным и достигать нескольких гигаом. Через это сопротивление происходит

слив заряда из потенциальной ямы с постоянной времени $\tau = RC$, где C — емкость алмазной структуры $\cong 1$ пФ. Для сопротивления $R = 1$ ГОм постоянная времени $\tau = 1 \cdot 10^{-3}$ с, реально постоянная времени фотосоответа — $\tau = 0,25 \cdot 10^{-3}$ с.

Высокое сопротивление алмаза позволяет подавать на подложку высокое напряжение (500 В и выше) вплоть до пробоя. При этом фотосоответ растет нелинейно: до 60 В — быстро, а затем стремится к насыщению при напряжении > 100 В. Напряжение шума, обусловленное протеканием темнового тока во внешней цепи, может незначительно возрастать начиная с 60 В. До этого значения напряжения темновой ток очень мал, шум определяется флуктуациями носителей в потенциальной яме и не превышает собственных шумов предусилителя.

Фотоэлектрические параметры УФ-приемников на природном алмазе

В ЗАО "УралАлмазИнвест" фотоприемники для спектрального диапазона 0,19—0,28 мкм на природном алмазе типа 2а изготавливаются серийно с предусилителем на базе относительно малочумящей микросхемы К744УД1а-1 (ФПА-1) и без усилителя (ФПЯ-1). Фотоприемники герметизированы в металлокерамические корпуса типа DIP-22 и DIP-16, соответственно. Размеры алмазных фоточувствительных элементов могут изменяться от 1 до 10 мм².

Конструктивное исполнение фотоприемника ФПЯ-1: металлокерамический корпус DIP-22 размерами 28×10 мм и наличие встроенного предусилителя.

Фотоэлектрические параметры фотоприемника ФПА-1

Спектральный диапазон, нм:	
собственной чувствительности.....	180—250
примесной фоточувствительности алмаза.....	1000—1300
Максимум спектральной чувствительности	
λ_{max} , нм:	
собственной.....	220
примесной.....	1130
Порог собственной чувствительности	
при λ_{max} , Вт/Гц ^{1/2}	$(1—2) \cdot 10^{-14}$
Порог примесной фоточувствительности	
при $\lambda_{\text{max}} = 1130$ нм, Вт/Гц ^{1/2}	$5 \cdot 10^{-5}$
Собственная вольтовая чувствительность S_v ,	
при λ_{max} , В/Вт.....	$2,3 \cdot 10^6$
Собственная токовая чувствительность S_i ,	
при λ_{max} , А/Вт.....	2
Размер фоточувствительной площадки, мм ²	1—10 и менее
Напряжение смещения/питания, В.....	5—60
Динамический диапазон линейности, Вт/см ²	$10^{-12}—10^{-2}$
Напряжение шума, В.....	$1 \cdot 10^{-5}$
Постоянная времени фотопроводимости, с.....	$250 \cdot 10^{-6}$

Конструктивное исполнение фотоприемника ФПЯ-1: металлокерамический корпус DIP-16 размерами 19×8 мм.

Фотоэлектрические параметры фотоприемника ФПЯ-1

Спектральный диапазон, нм:

собственной чувствительности	180—250
примесной фоточувствительности алмаза	1000—1300
Максимум спектральной чувствительности	
λ_{\max} , нм:	
собственной	220
примесной	1130
Порог собственной чувствительности	
при λ_{\max} , Вт/Гц ^{1/2}	(1—2)·10 ⁻¹⁴
Порог примесной фоточувствительности	
при $\lambda_{\max} = 1130$ нм, Вт/Гц ^{1/2}	5·10 ⁻⁵
Собственная вольтовая чувствительность S_v	
при λ_{\max} , В/Вт	300
Собственная токовая чувствительность S_i	
при λ_{\max} , А/Вт	0,15
Размер фоточувствительной площадки, мм ²	1—10 и менее
Напряжение смещения/питания, В	5—100
Динамический диапазон линейности, Вт/см ²	10 ⁻¹² —10 ⁻²
Напряжение шума, В	2,5·10 ⁻⁹
Постоянная времени фотопроводимости, с	250·10 ⁻⁶

Многоэлементные фотоприемники на природном алмазе

Физика фотоприема на алмазе позволяет создавать как линейные, так и матричные многоэлементные структуры [5—10]. Потенциальные ямы не взаимодействуют на расстоянии 10 мкм и более, и связь между фоточувствительными элементами практически только оптическая. При измерении фотоэлектрическая и оптическая связь на расстоянии 100 мкм между соседними фоточувствительными элементами (ФЧЭ) составила не более 1 %. К сожалению, фотоприемники на алмазе ограничены по площади. На кристалле 2×2 мм более 64 ФЧЭ размером 50×50 мкм в линию уместить невозможно. Для матричного фотоприемника с тем же размером ФЧЭ число элементов разложения не превышает 4096. Природные алмазы дороги, особенно крупные. Но и этого числа ФЧЭ достаточно для решения многих задач по обнаружению объектов со слабым оптическим излучением в УФ-спектре.

Механизм считывания информации можно осуществить по принципу передачи накопленного сигнала от одной потенциальной ямы к другой. Это может быть принцип ПЗС или принцип "пожарных цепочек". В любом случае необходимо перемещение заряда по поверхности алмаза. Проведенные исследования показали, что заряд по алмазу можно перемещать, при этом напряжение, подаваемое на затвор прилегающей потенциальной ямы, составляет около 18 В.

Выводы

Ultraviolet photodetector from 2a-type natural diamond for the 0.19—0.28 μm spectral range

A. A. Altukhov, V. V. Eremin, V. A. Kireev, A. V. Mitenkin
UralAlmazInvest Inc., Moscow, Russia

The single-element photodetectors with a level of photoelectric parameters, close to settlement, are obtained for the 0.19—0.28 μm spectral range. The sensitivity to the visible light misses. Direct

1. Спектральная характеристика природного алмаза типа 2а позволяет выделять и детектировать УФ-излучение в области спектра $\lambda = 0,19—0,28$ мкм в приборах с кварцевым входным окном. При отсутствии входного окна алмаз сохраняет высокую чувствительность в диапазоне от $1 \cdot 10^{-4}$ до 0,28 мкм. Алмаз нечувствителен к видимому свету, однако имеет относительно невысокую чувствительность в ИК-диапазоне на 1—1,3 мкм.

2. УФ-излучение в диапазоне $\lambda = 0,19—0,28$ мкм в гораздо меньшей степени поглощается кислородом воздуха, чем озоном, имеющим высокую концентрацию на высотах 20—35 км, и этот диапазон может использоваться для регистрации слабых излучений при небольших высотах (3—5 км).

3. Уровень фотоэлектрических параметров приемников УФ-излучения на природном алмазе достигает значений, близких к теоретически возможным для спектрального диапазона $\lambda = 0,19—0,28$ мкм.

4. Проведенные исследования физики фотоприема позволяют надеяться, что на природном алмазе могут быть созданы линейные и матричные фотоприемники, работающие по принципу ПЗС.

Литература

1. Анисимова И. Д., Стафеев В. И. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе широкозонных соединений A_3B_5 // Прикладная физика. 1999. № 2.
2. Квасков В. Б. Природные алмазы России. — М.: Полярон, 1997. С. 93—96.
3. Татаринов В. С. Алмаз в электронной технике// Сб. статей. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 248 с.
4. Хадсон Р. Инфракрасные системы. — М.: Мир, 1972.
5. Бараночников М. Г., Гладкова Н. А., Скрипник Ф. В. Алмаз в электронной технике// Сб. статей. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 248 с.
6. Трищенко М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992. — 400 с.
7. Суэмацу Я., Катаока С. и др. Основы оптоэлектроники: Пер. с яп./ Под ред. К. М. Голанта. — М.: Мир, 1988. — 288 с.
8. Залетаев Н. Б., Сиваченко С. Д. Насыщение зависимости фототока от напряжения в кристаллах природного алмаза при ультрафиолетовом освещении, параллельном электрическому полю: Тр. Междунар. конф. "Алмазы в электронной технике и электронике". 26—28 мая, 1998. С. 21—24. — М.: Полярон, 1998.
9. Природные алмазы России/Под ред. В. Б. Кваскова. — М.: Полярон, 1997. — 304 с.
10. Zaletaev N. b., Alekseev A. A., Amosov V. N., Feigelson B. N. — Comparative study of natural and synthetic type Iia diamond detectors: Proc. SPIE 4141, 2000. P. 357—365.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

sun rays incident on the photodetector (at an energy irradiance more than $1 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2$) excite a photoanswer, which is stipulated, apparently, by activation of local centres in a forbidden region of diamond. The limit of sensitivity on a direction on the Sun is lower than $P_r = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ W/Hz}^{1/2}$. In the $0.19\text{--}0.28 \text{ }\mu\text{m}$ spectral range at $\lambda_{\text{max}} = 0.225 \text{ }\mu\text{m}$ the limit of sensitivity is close to the rated level $P_r = (1\text{--}2) \cdot 10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$. The physical principles of photoreception by means of natural diamond and promise for the development of multi-element diamond photodetectors are surveyed.