

К. т. н. А. А. АЛТУХОВ, д. ф.-м. н. А. Ю. МИТЯГИН,
Е. В. ГОРОХОВ, к. ф.-м. н. В. С. ФЕЦЕНКО,
к. ф.-м. н. Н. Х. ТАЛИПОВ

Россия, г. Москва, ООО «УралАлмазИнвест»;
г. Фрязино, Институт радиотехники и электроники
E-mail: info@ural-almaz.ru, alexandr-mityagin@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
12.03 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

АЛМАЗНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

Изготовлены и исследованы планарные алмазные «солнечно-слепые» фотоприемники УФ-диапазона. Приведено теоретическое обоснование принципов работы и экспериментальные параметры фотоприемников в фоторезистивном и фотодиодном режимах.

Широкий круг современных технических задач диктует необходимость построения нового типа многоспектральных помехозащищенных оптоэлектронных систем с предельными обнаружительными характеристиками в ультрафиолетовой области спектра. Основой оптоэлектронной системы является фотоприемник.

Большие перспективы в развитии фотоприемников ультрафиолетового (УФ) диапазона связаны с алмазными материалами — благодаря их уникальным свойствам. Наиболее значимыми в алмазных фотоприемниках [1] являются: возможность построения полностью "солнечно-слепого" фотоприемника — с чувствительностью в области жесткого УФ-излучения ($<0,3$ мкм); удивительно высокая спектральная селективность фотоприемников на основе совершенных и чистых кристаллов 2а-типа, для которых удается подавить чувствительность в видимой области спектра ($0,4—0,7$ мкм) более чем на три порядка по отношению к максимуму чувствительности в диапазоне УФ-С; возможность управления одним из важных параметров — областью спектральной чувствительности алмаза путем простого отбора естественных кристаллов с различной концентрацией примеси (дефектов).

В данной работе приведены результаты исследования алмазных УФ-фотоприемников с планарной и "сэндвич"-моделями расположения электродов на основе природного алмаза 2а-типа.

Для построения физической модели и эквивалентной схемы, для анализа механизмов фотоэффектов в алмазных фотоприемниках были изготовлены и исследованы четыре типа структур.

Структура ФП-1 типа "сэндвич": Al—алмаз—Al с концентрацией примесных атомов азота $N_A = 6,8 \cdot 10^{17}$ ат./см³. На плоском кристалле алмаза размерами $0,29 \times 2,36 \times 2,99$ мм сверху и снизу (на поверхностях $2,36 \times 2,99$ мм) наносились алюминиевые контакты толщиной $0,03$ мкм.

Структура ФП-2 планарного типа: Al—алмаз—Al, $N_A = 4,58 \cdot 10^{18}$ ат./см³. На плоском кристалле ($0,27 \times 3,52 \times 2,71$ мм) два алюминиевых электрода в виде двух параллельных полос изготавливались на одной поверхности кристалла ($3,52 \times 2,71$ мм). Зазор между алюминиевыми полосами составлял $0,5$ мм, толщина слоя — 5 мкм.

Структура ФП-3 представляла собой стандартный алмазный фотоприемник ФПЯ-1 № 003: Pt—алмаз—Al, $N_A = 1,45 \cdot 10^{19}$ ат./см³. На верхней, облучаемой поверхности формировался полупрозрачный Pt-контакт толщиной $0,03$ мкм, а на нижней, неосвещаемой поверхности изготавливался алюминиевый электрод.

Структура ФП-4 симметричная с двух сторон алмаза: Pt—алмаз—Pt, $N_A = 4,02 \cdot 10^{18}$ ат./см³. Образец отличался от стандартной структуры ФП-3 тем, что не только на верхнюю, но и на нижнюю (неосвещаемую) поверхность наносится платиновый слой.

Так как алмаз в изготовленных структурах имеет толщину $0,2—0,3$ мм, то его объемное сопротивление в эквивалентной схеме фотоприемника включено последовательно и может существенно влиять на параметры прибора. Чтобы оценить это сопротивление, были определены вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоприемников [2]. Обнаружено, что ВАХ фотоприемника ФП-1 (с "сэндвич"-электродами) нелинейна. Наклон ВАХ в обратном направлении (при подаче положительного смещения на нижний контакт) примерно в полтора раза больше, чем в прямом. В то же время для ФП-2 (с планарным расположением электродов) ВАХ практически линейна в диапазоне напряжения ± 150 В.

Нелинейность ВАХ фотоприемника ФП-1 может свидетельствовать об асимметрии алюминиевых контактов данной структуры. Расчет показал, что удельная проводимость фотоприемника ФП-2 примерно на порядок выше, чем у ФП-1. Это может объясняться различным уровнем легирования азотом: во втором фотоприемнике концентрация азота в алмазе выше, но только на полпорядка. Можно предполагать, что в общую проводимость планарного фотоприемника ФП-2 вносит свой вклад поверхностная проводимость. Разрыв химических связей на поверхности алмаза может приводить к образованию поверхностных состояний. Плотность этих состояний может быть достаточной для возникновения прыжкового механизма переноса носителей по поверхностным локализованным состояниям. Различие в проводимостях может

быть связано также с концентрацией нескомпенсированных носителей ($N_d - N_a$, где N_d и N_a — концентрации соответственно доноров и акцепторов) или степенью их взаимной компенсации. В таком случае можно при существенном различии в концентрациях азота в образцах алмаза получить примерно одинаковую проводимость.

Для исследования фотоэлектрических характеристик фотоприемника структуры освещались светом дейтериевой лампы ЛТ-6Б, пропущенным через монохроматор МДР-23, где и выделялось излучение нужной длины волны.

На рис. 1 приведена ВАХ фотоприемника ФП-3 при облучении светом с длиной волны 210 нм. ВАХ имеет явно выраженную нелинейность. Также следует отметить, что при нулевом напряжении смещения наблюдается небольшой фототок, что типично для классических $p-n$ - и Шоттки-барьерных фотодиодов. Этот ток течет в обратном направлении, так что алмаз проявляется в этом эффекте как полупроводник дырочного типа проводимости. Знак фототока обуславливает изгиб зон, характерный для дырочного полупроводника, и образование области пространственного заряда у поверхности алмаза на границе с Pt-электродом при его освещении. В то же время в отсутствие освещения ВАХ ФП-3 остается симметричной и линейной, что свидетельствует об отсутствии Шоттки-барьера, т. е. алмаз ведет себя как классический диэлектрик.

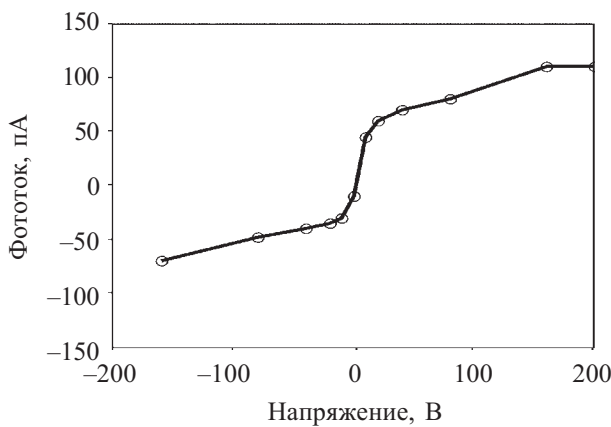


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика алмазного фотоприемника ФП-3 при облучении светом с длиной волны 210 нм

Столь большая несимметричность ВАХ облучаемого фотоприемника не может быть объяснена только повышением эффективности разделения зарядов на барьере Шоттки, т. к. она наблюдается (хоть и в меньшей степени) и при омических алюминиевых контактах. С другой стороны, эту несимметричность можно объяснить разным временем жизни носителей заряда. Как известно [3], почти полное поглощение света с длиной волны 210 нм происходит в алмазе на глубине 3—4 мкм. В случае если мы прикладываем положительный потенциал на нижний электрод, дырки дрейфуют к верхнему электроду, а электроны — к нижнему. При увеличении потенциала все большее количество дырок вытягивается из алмаза, и наступает момент, когда поле вытягивает все заряды из

освещенной области, и происходит насыщение ВАХ, характерное для инжекционных токов, ограниченных объемным зарядом [4].

При смене полярности насыщение происходит гораздо раньше в связи с тем, что дырки рекомбинируют в объеме алмаза, не доходя до противоположного электрода, и весь ток определяется электронами. Столь различное время жизни носителей связано со структурой примесных уровней в запрещенной зоне E_g алмаза (рис. 2).

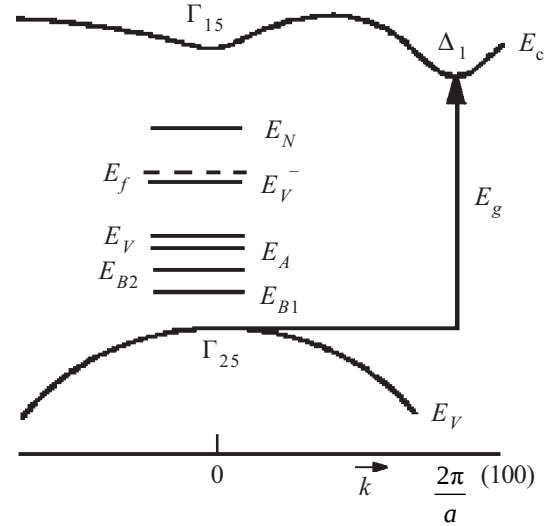


Рис. 2. Расположение примесных уровней в запрещенной зоне алмаза, согласно [3]:

E_N, E_V^-, E_A — донорные уровни; E_V — нейтральная вакансия; E_{B2}, E_{B1} — акцепторные уровни; E_f — уровень Ферми; Γ_{15}, Γ_{25} — характерные минимумы-максимумы на зонной диаграмме алмаза; E_c — уровень зоны проводимости; Δ_1 — уменьшение потенциального барьера для данного непрямого перехода; k — волновой вектор; a — постоянная решетки алмаза

В связи с тем, что примесные уровни в алмазе залегают глубоко, то при комнатной температуре они не оказывают никакого влияния на темновой ток и являются практически неионизованными. С другой стороны, рекомбинация зарядов в широкозонном полупроводнике идет в основном через уровень, расположенный вблизи уровня Ферми [5]. Для дырок это, очевидно, донорный уровень E_V^- . Для электронов такие уровни отсутствуют, что серьезно затрудняет рекомбинацию и увеличивает время их жизни.

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики для образца ФП-4. В этой структуре обе ветви — прямая и обратная — почти линейны, причем в обратном смещении фоточувствительность вдвое выше, чем в прямом.

Вольт-емкостные характеристики $C(U)$ алмазных фотоприемников измерялись мостовым методом. Емкость образцов C практически не зависела от напряжения, что свидетельствовало о том, что в отсутствие облучения алмаз ведет себя как классический изолятор, и барьер Шоттки не образуется.

При измерениях частотных зависимостей емкости во всем диапазоне частот ($f=100$ Гц ... 20 кГц) измерительный мост показывал нулевое значение активной проводимости, что свидетельствовало о чисто емкостном характере проводимости фотоприемника на переменном сигнале.

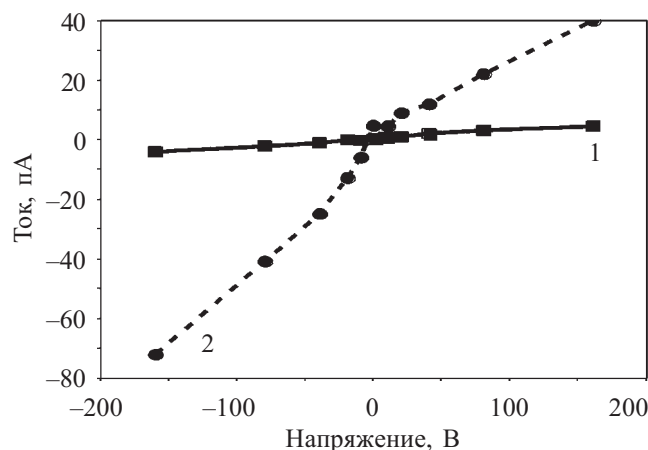


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структуры ФП-4: 1 — в отсутствие облучения; 2 — при облучении

Установлено, что вольт-ваттные характеристики алмазных фотоприемников линейны в диапазоне изменения облученности на четыре порядка.

На экспериментальных спектральных характеристиках максимум чувствительности всех измеренных образцов лежал практически на одной длине волны ($\lambda=0,21\dots0,215$ мкм), при этом длинноволновая граница чувствительности монотонно смещается вправо с соответствующим увеличением концентрации азота в алмазе.

Эквивалентная схема алмазного фотоприемника представляет собой параллельно соединенные конденсатор и генератор фототока. Особенностью алмазного приемника является существенная зависимость чувствительности от напряжения.

В 2003 г. сотрудниками «УралАлмазИнвест» впервые был разработан и запатентован УФ-фотоприемник на природном алмазе типа 2а с максимумом чувствительности на длине волны 0,21 мкм. Отношение сигнал/шум данного фотоприемника на модулированном потоке излучения достигает порядка 10^5 . Фотоотклик наблюдается только в области собственного поглощения алмаза ($E_g=5,5$ эВ; $\lambda_{\max}=210$ нм). В видимом диапазоне фоточувствительность отсутствует до освещенности 10^{-3} Вт/см² (фотоотклик на контакте «металл—полупроводник»).

Фотоприемники изготавливаются серийно, герметизированы в металлокерамические корпуса: с предуслителем на базе малошумящей микросхемы К744УД1а-1 в корпусе типа DIP-22 (ФПА-1) и без усилителя в корпусе DIP-16 (ФПЯ-1). Размеры алмазных фоточувствительных элементов могут изменяться от 1 до 10 мм². Фотоприемники ФПА-1 и ФПЯ-1 классифицируются как солнечно-слепые. Их спектральные характеристики позволяют без существенного снижения квантового выхода детектировать электромагнитное излучение вплоть до 0,1 нм (мягкий

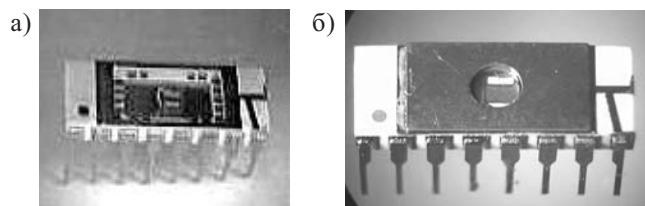


Рис. 4. Внешний вид фотоприемников ФПА-1 (а) и ФПЯ-1 (б)

Фотоэлектрические параметры фотоприемников ФПА-1 и ФПЯ-1

Параметры	Тип фотоприемника	
	ФПА-1	ФПЯ-1
Спектральный диапазон чувствительности, нм	180—250	180—250
Максимум спектральной чувствительности $\lambda_{\max}$, нм	210	210
Максимум спектральной плимесной чувствительности $\lambda_{\max}$, нм		1130
Полог чувствительности при $\lambda_{\max}$, Вт/Гц ^{1/2}	$(1\dots2)\cdot 10^{-13}$	$(1\dots2)\cdot 10^{-13}$
Токовая чувствительность S_i при $\lambda_{\max}$, А/Вт		0,15
Вольтовая чувствительность S_V при $\lambda_{\max}$, В/Вт	$2,3\cdot 10^6$	0,15
Размер фоточувствительной площадки, мм ² , не более	1—10	1—10
Напряжение смещения/питания, В	5—60	5—100
Динамический диапазон линейности, Вт/см ²	10^4	10^4
Напряжение шума, В/Гц ^{1/2}	—	$2,5\cdot 10^{-9}$
Постоянная времени фотопроводимости, с	$250\cdot 10^{-6}$	$100\cdot 10^{-6}$

рентген). Они чрезвычайно устойчивы к ионизирующему излучению и способны работать в открытом космосе. В астрофизике такие фотоприемники можно использовать в приборах ориентации на Солнце, оценивать ультрафиолетовую составляющую спектра звезд и т. д.

На рис. 4 представлен внешний вид фотоприемников ФПА-1 и ФПЯ-1, в таблице приведены их фотоэлектрические параметры.

Выводы

Изготовленные и исследованные УФ-фотоприемники на основе природного алмаза 2а с различным содержанием азота продемонстрировали возможность реализации как фоторезистивного, так и фотодиодного принципов работы алмазных УФ-фотоприемников. Использование природных алмазов позволило создать уникальные «солнечно-слепые» УФ-фотоприемники с максимумом чувствительности на длине волны 0,21 мкм.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гуляев Ю. В., Алтухов А. А., Митягин А. Ю. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе алмаза 2а типа для нового поколения аппаратуры наблюдения и распознавания объектов // Наука и технологии в промышленности.— 2006.— № 4 (1).— С. 93—96.
2. Алтухов А. А., Киреев В. А., Кирилин Н. М. и др. Фотоприемники для оптоэлектронных систем УФ-диапазона на природных алмазах // Радиотехника и электроника.— 2006.— Т. 51, № 12.— С. 1526—1529.
3. Квасков В. Б. Природные алмазы России.— М.: Полярон, 1997.
4. Lampert M. A., Mark P. Current injection in solids.— New York: Academic Press, 1970.
5. Роуз А. Основы теории фотопроводимости.— М.: Мир, 1966.