

Фотоэлектроника

УДК 621.383.52:621.382.13

Свойства фотодиодов Шоттки с туннельно-прозрачным диэлектриком на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

В. Дамьянович

Горно-геологический факультет Университета в Белграде, Югославия

В. П. Пономаренко

ГУП «НПО «Орион»», Москва, Россия

Приведены результаты исследования основных характеристик фотодиодов на основе CdHgTe (КРТ) p -типа со структурой металл—туннельно-прозрачный диэлектрик—полупроводник (МТДП-фотодиоды), на область спектра 8—11 мкм.

Высота потенциального барьера определяет важнейшие свойства диодов, в первую очередь дифференциальное сопротивление при нулевом смещении R_0 , которое, в свою очередь, может ограничивать предельные параметры фоточувствительных структур на их основе. Для обеспечения высоких значений обнаружительной способности D^* необходимы фотодиоды со значением R_0 , которое тем выше, чем больше высота потенциального барьера диода. Последний, изготовленный осаждением металла непосредственно на поверхность полупроводника, как правило, заметно ниже, чем в структурах с промежуточным диэлектрическим слоем. Это объясняется высокой плотностью поверхностных состояний на границе металл — полупроводник. Предварительная пассивация поверхности сверхтонким, туннельно-прозрачным для основных носителей слоем диэлектрика способна на несколько порядков снизить плотность поверхностных состояний. Кроме того, скорость поверхностной рекомбинации на такой пассивированной поверхности значительно ниже, что, в свою очередь, должно приводить к увеличению квантовой эффективности в МТДП-фотодиодах. Эти обстоятельства вместе с относительной технологической простотой изготовления МТДП-структур делают последние привлекательными для использования в качестве фоточувствительных элементов в современных фотоприемных устройствах.

МТДП-фотодиоды с размерами фоточувствительных элементов $50 \times 50 \text{ мкм}^2$ изготавливались на подложках КРТ p -типа ($x \sim 0,2$) с концентрацией основных носителей $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (80 К). Сверхтонкий промежуточный слой диэлектрика толщиной $\delta = 5 - 9 \text{ нм}$ создавался высокочастотным магнетронным распылением мишеней из

Al_2O_3 или SiO_2 в кислородсодержащей плазме либо плазменным фторированием поверхности в плазме SF_6 с образованием серафторсодержащих собственных соединений КРТ. В качестве барьерных металлов использовались слои Al, Cr, Mo, Ti толщиной $\sim 10 \text{ нм}$, обладающие достаточным оптическим пропусканием в диапазоне длин волн 8—12 мкм. Структура МТДП-фотодиода приведена на рис. 1.

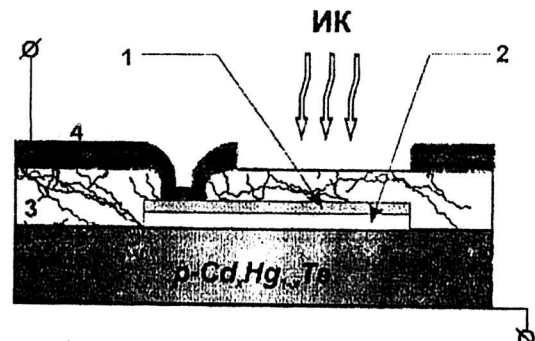


Рис. 1. Структура МТДП-фотодиода на основе КРТ: 1 — барьерный металл; 2 — туннельно-прозрачный диэлектрик; 3 — периферийный диэлектрик; 4 — контактный металл

Спектральные характеристики

Зависимости токовой чувствительности МТДП-фотодиодов от длины волны $S_\lambda(\lambda)$ по отношению к монохроматическому излучению в интервале длин волн 0—14 мкм измерялись по общепринятой методике на спектрофотометре ИКС-31.

Семейство типичных характеристик монохроматической чувствительности, приведенных к $S_{\lambda, \text{max}}(\lambda)$, для нескольких МТДП-фотодиодов показано на рис. 2.

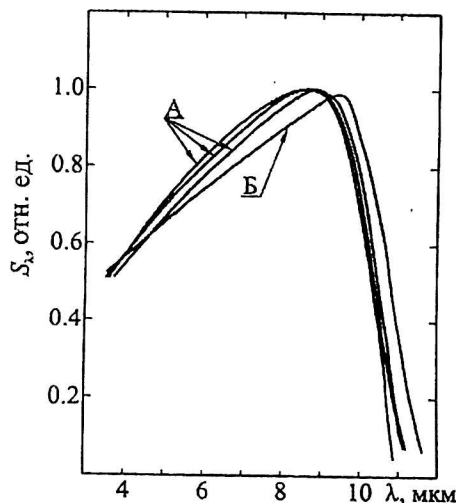


Рис. 2. Спектральные характеристики токовой чувствительности по отношению к монохроматическому излучению: в МТДП-фотодиодах (кривая А); в фотодиоде с p - n -переходом (кривая Б) на основе p - $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ при $T = 80$ К

В длинноволновой области спектра зависимости $S_{\lambda}(\lambda)$ характеризуются резким уменьшением S_{λ} по мере приближения к граничной длине волны, определяемой шириной запрещенной зоны полупроводниковой подложки. В этой области спектра спектральные характеристики мало отличаются от соответствующих характеристик фотодиодов с p - n -переходом (см. кривую Б).

В коротковолновой области спектра токовая чувствительность МТДП-диодов несколько выше, чем у фотодиодов с p - n -переходом. Это объясняется меньшей скоростью поверхностной рекомбинации на поверхности КРТ, пассивированной туннельным диэлектриком. Более крутой спад спектральных характеристик токовой чувствительности в области малых длин волн в МТДП-фотодиодах можно объяснить поглощением фотонов на свободных носителях зарядов в металлическом затворе МТДП-фотодиода.

Токовая чувствительность и квантовая эффективность

Источники реальных целей и фонов обычно моделируются телами, спектр излучения которых близок к спектру абсолютно черного тела (АЧТ). В этом случае выражение для приведенной к максимуму токовой чувствительности имеет вид

$$S_{i,\lambda \max} = \frac{I_s}{\Phi_p(\text{АЧТ})} \mu\text{с},$$

где I_s — ток фотосигнала, протекающий через фотодиод;

Φ_p — мощность потока оптически модулированного излучения, падающего на фоточувствительный элемент от АЧТ с температурой T_B ;

K — коэффициент, учитывающий спектральную зависимость квантовой эффективности $\eta(\lambda)$.

Предельное значение $S_{i,\lambda \max}$, рассчитанное на основе данных о спектральном распределении чувствительности для МТДП-фотодиодов при $\eta(\lambda) = 1$, составляет $\sim 7,5 \text{ А}\cdot\text{Вт}^{-1}$.

В таблице представлены значения токовой чувствительности по отношению к излучению АЧТ с $T_B = 500$ °С для МТДП-фотодиодов на основе КРТ p -типа с $x \sim 0,2$.

Из таблицы следует, что токовая чувствительность исследованных фотодиодов лежит в интервале $4\text{--}6 \text{ А}\cdot\text{Вт}^{-1}$, тогда из сравнения с $S_{i,\lambda \max} \sim 7,5 \text{ А}\cdot\text{Вт}^{-1}$ можно сделать вывод, что квантовая эффективность МТДП-фотодиодов на основе КРТ p -типа для области спектра $8\text{--}11$ мкм составляет $60\text{--}80\%$.

Высокие значения квантовой эффективности в МТДП-фотодиодах определяются малой скоростью поверхностной рекомбинации на пассивированной туннельным диэлектриком поверхности КРТ.

Основные параметры МТДП-фотодиодов из КРТ p -типа на область спектра $8\text{--}11$ мкм

Концентрация дырок в подложке, см^{-3}	Барьерный металл	Туннельный диэлектрик	Токовая чувствительность, $\text{А}\cdot\text{Вт}^{-1}$	$D_{\lambda \max}^*$, $\text{см}\cdot\text{Гц}^{1/2}\cdot\text{Вт}^{-1}$	
				1,2 кГц	20 кГц
$3,0\cdot 10^{15}$	Al	Al_2O_3	5,1	$2,0\cdot 10^{10}$	$2,6\cdot 10^{10}$
$6,0\cdot 10^{15}$	Cr	Al_2O_3	4,6	$2,2\cdot 10^{10}$	$2,9\cdot 10^{10}$
$1,1\cdot 10^{16}$	Cr	ПФ	5,2	$3,3\cdot 10^{10}$	$4,3\cdot 10^{10}$
$1,0\cdot 10^{16}$	Cr	SiO_2	4,7	$3,0\cdot 10^{10}$	$4,0\cdot 10^{10}$
$1,0\cdot 10^{16}$	Mo	SiO_2	6,2	$4,1\cdot 10^{10}$	$5,3\cdot 10^{10}$
$1,0\cdot 10^{16}$	Ti	Al_2O_3	5,2	$3,5\cdot 10^{10}$	$4,6\cdot 10^{10}$
$2,0\cdot 10^{15}$	Ti	ПФ	5,3	$3,1\cdot 10^{10}$	$4,1\cdot 10^{10}$

Спектры шума

Исследования спектральной зависимости шумового тока МТДП-фотодиодов проводились в полосе частот 25—20 000 Гц.

На рис. 3 приведены зависимости спектральной плотности шумового тока S_I от частоты f при различных смещениях и фоновых освещенностях.

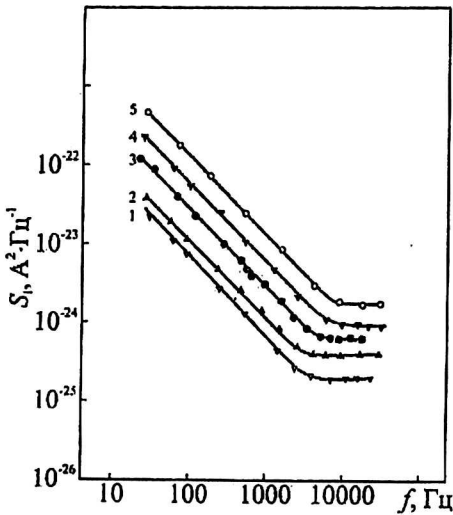


Рис. 3. Спектральные зависимости плотности шумового тока в МТДП-фотодиоде с барьером Шоттки Cr-SiO₂-p-(Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te) при 80 К для различных обратных смещений на фотодиоде $V_{см}$:
 1 - $V_{см} = 0$, $T_{фонн} = 80$ К; 2 - $V_{см} = 0$, $T_{фонн} = 300$ К;
 3 - $V_{см} = 30$ мВ, $T_{фонн} = 300$ К; 4 - $V_{см} = 50$ мВ, $T_{фонн} = 300$ К; 5 - $V_{см} = 70$ мВ, $T_{фонн} = 300$ К

Все характеристики имеют два явно выраженных участка: первый — в диапазоне частот 25—3000 Гц, где имеет место практически линейное уменьшение $\lg S_I$ с ростом частоты; второй — начиная с некоторой граничной частоты $f_{гр}$, где величина S_I перестает зависеть от f .

Граничная частота зависит от смещения, приложенного к МТДП-фотодиоду (рис. 4). С увеличением обратного смещения величина $f_{гр}$ растет во всем исследованном интервале частот.

Спектральные характеристики шумового тока $S_I(f)$ могут быть описаны зависимостью вида

$$S_I(f) = \frac{A}{f^\alpha} + B,$$

где A и B — коэффициенты; $\alpha \sim 1,2$.

В диапазоне частот $f < f_{гр}$ доминирующим является шум типа $1/f$.

Плотность шумового тока Джонсона-Найквиста при $f > 3 \cdot 10^3$ Гц составляет $\sim 1,5 \cdot 10^{-25}$ А²·Гц⁻¹ и примерно в четыре раза меньше наблюдаемой плотности шумов.

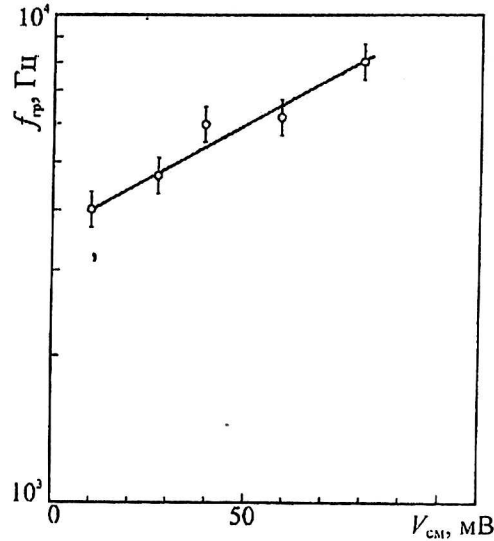


Рис. 4. Зависимость граничной частоты $f_{гр}$ от величины обратного смещения в МТДП-фотодиоде из p-Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te при $T = 80$ К

Таким образом, при частотах $f > f_{гр}$ результирующий шум в МТДП-фотодиодах определяется флуктуациями фонового излучения.

Обнаружительная способность

Измеренные значения обнаружительной способности D^* МТДП-фотодиодов даны в вышеприведенной таблице.

Для согласования исследуемых фотодиодов с входом измерительного тракта использовался предусилитель, работающий в режиме измерения тока при нулевом входном сопротивлении. Коэффициент преобразования усилителя при воздействии модулированного сигнала известной мощности составлял 0,1 Вт·мкА⁻¹.

Обнаружительная способность $D^*_{АЧТ}$ по отношению к АЧТ с температурой $T_B = 500$ °С определялась по формуле

$$D^*_{АЧТ} = \frac{I_S}{I_N} \sqrt{\Delta \Delta f_e} \frac{1}{\Phi_p} (D^*_{\lambda_{max}} = D^*_{АЧТ} K),$$

где I_S — фототок сигнала;

I_N — шумовой ток, измеренный на частоте модуляции $f_{мод}$ в полосе частот усилительного тракта Δf_e ;

A — площадь фоточувствительного элемента;

K — коэффициент пересчета, определяемый спектральной зависимостью квантовой эффективности.

Используемая частота модуляции составляла 1200 Гц, где шумы типа $1/f$ отсутствуют.

Значения обнаружительной способности исследованных МТДП-фотодиодов лежат в пределах $(2-5) \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ и близки к фоновому пределу.

Заключение

Исследованы спектральные зависимости токовой чувствительности и шумового тока МТДП-фотодиодов со структурой металл – туннельно прозрачный диэлектрик- p - $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$.

Квантовая эффективность исследованных фотодиодов составляет 60–80 % и определяется скоростью поверхностной рекомбинации на пассивированной туннельным диэлектриком поверхности $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$. Спектральные характеристики фотоответа имеют особенности в области длин волн $\lambda < \lambda_{\text{max}}$, связанные с погло-

щением ИК-излучения на свободных носителях в металлических затворах МТДП-фотодиодов.

Изготовленные фотодиоды на область спектра 8–12 мкм имеют следующие характеристики: токовая чувствительность в максимуме спектральной характеристики 3–6 $\text{A}\cdot\text{Вт}^{-1}$; удельная обнаружительная способность $(2-5)\cdot 10^{10}$ $\text{см}\cdot\text{Гц}^{1/2}\cdot\text{Вт}^{-1}$.

Шумовые свойства на частотах меньше 3–4 кГц определяются шумами типа $1/f$.

Показана перспективность использования МТДП-фотодиодов в качестве фоточувствительных элементов при изготовлении фотоприемников из КРТ на область спектра 8–12 мкм.

The properties of Schottky-barrier photodiodes based on $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ with tunnel transparent dielectric

V. Damnjanovic

Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, Yugoslavia

V. P. Ponomarenko

RD & P Center "Orion", Moscow, Russia

Photoelectric properties of photodiodes, based on Schottky-barrier structure with tunnel transparent dielectric in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ with $x \sim 0,2$, have been studied.