УДК 621.383.52:621.382.13

Свойства барьеров Шоттки со структурой металл—туннельно-прозрачный диэлектрик p-$Cd_xHg_{1-x}Te$

В. Дамньянович
Горно-геологический факультет Университет, г. Белград, Югославия

В. П. Пономаренко
ГУП «НПО "Орион"», Москва, Россия

Исследованы потенциальные барьеры в диодах Шоттки со структурой МТДП (металл—туннельно-прозрачный диэлектрик—полупроводник) на основе твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) с x ~0,2. В качестве барьерного металла использовались: In, Ti, Mo, Al и Cr. Сверхтонкие диэлектрические слои создавались методом высокочастотного магнетронного распыления мишени из Al_2O_3 в кислородсодержащей плазме либо методом плазменного фторирования поверхности КРТ во фторсодержащей плазме (ПФ КРТ).

Развитие микрофотоэлектроники стимулирует поиск новых методов создания фоточувствительных структур на основе узкозонных твердых растворов (CdHg)Te. К числу последних относятся МТДП-структуры — металл—туннельно-прозрачный диэлектрик—полупроводник (барьер Шоттки с промежуточным слоем диэлектрика), в которых относительная технологическая простота изготовления сочетается с высокими фотоэлектрическими параметрами. В работе проведе-

© Дамньянович В., Пономаренко В. П., 2003

ны исследования основных свойств потенциальных барьеров в МТДП-структурах на основе p-$Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$.

Методы изготовления МТДП-структур на основе КРТ

Для получения барьеров Шоттки в МТДП-диодах на основе p-КРТ необходимы металлы с работой выхода φ_M, меньшей работы выхода КРТ. Работа выхода КРТ с $x \sim 0,2$ составляет ~5 эВ. Для изготовления МТДП-структур в качестве барьерных металлов были выбраны титан, молибден, индий, алюминий и хром, работа выхода которых, по литературным данным, порядка 4 эВ и которые обладают хорошими адгезионными свойствами.

При изготовлении фотоприемников на основе МТДП-структур ИК-излучение должно поглощаться в области потенциального барьера. Это выдвигает к барьерным металлам два дополнительных требования: максимальное оптическое пропускание в области длин волн 8—14 мкм и малое удельное сопротивление, обеспечивающее незначительное падение напряжения на толще контактов, и малое сопротивление растекания. Для обеспечения высокого оптического пропускания толщина пленок должна быть менее 10 нм.

При разработке способов создания таких покрытий на поверхности КРТ, пассивированной туннельно-прозрачным диэлектрическим слоем, нами был выбран метод высокочастотного магнетронного распыления в плазме аргона. Разработанные методы позволяли получить металлические покрытия толщиной 7—10 нм.

Некоторые свойства разработанных покрытий на основе Mo, Cr, Ti приведены в табл. 1. Здесь же приведены свойства сверхтонких покрытий из Au, перспективных при создании МТДП-структур на основе n-КРТ.

Таблица 1

Свойства сверхтонких металлических покрытий, изготовленных высокочастотным магнетронным распылением в плазме аргона

Элемент	Толщина, нм	R, Ом/□	Оптическое пропускание в диапазоне 5—14 мкм, %
Au	5	25	55
	8	1	34
Mo	7	120	80
	14	10	25
Cr	6	130	65
	15	50	40
Ti	7	300	75
	20	80	10

При толщине 5—10 нм оптическое пропускание составляет в исследованных образцах 60—80 %.

Промежуточный диэлектрический слой должен удовлетворять следующим основным требованиям: плотность поверхностных состояний на границе раздела КРТ—диэлектрик не должна превышать $(2—5)\cdot10^{11}$ эВ$^{-1}$·см$^{-2}$, а толщина промежуточного диэлектрического слоя должна составлять не более 9 нм, что обеспечивает возможность эффективного туннелирования основных носителей из полупроводника в металл.

Промежуточные сверхтонкие диэлектрические слои толщиной 5—7 нм создавались методом высокочастотного магнетронного распыления мишени из Al_2O_3 в кислородсодержащей плазме либо методом плазменного фторирования поверхности КРТ во фторсодержащей плазме. При ВЧ-магнетронном распылении на образец попадает молекулярный пучок, что обеспечивает плотную упаковку пленки и приводит к существенному снижению количества дефектов в ней. Лучшие свойства границы раздела в системе КРТ—диэлектрик получались при использовании плазмообразующих смесей с добавкой трифторэтана [1]. В этом случае в составе "собственного" диэлектрика обнаруживался фтор. Поэтому для образования фторсодержащей плазмы при плазменном фторировании поверхности КРТ нами был выбран гексафторид серы (SF_6). Оба способа изготовления промежуточного диэлектрического слоя в МТДП-структурах обеспечивали получение сверхтонких (~5—7 нм) покрытий и удовлетворительное качество границы раздела диэлектрик—полупроводник: плотность положительного фиксированного заряда $\leq10^{11}$ см$^{-2}$, плотности "быстрых" и "медленных" поверхностных состояний ~10^{11} и 10^{10} см$^{-2}$ · эВ$^{-1}$, соответственно.

Вольт-амперные характеристики МТДП-диодов

В отличие от диодов с p-n-переходом токопрохождение в диодах с барьером Шоттки осуществляется главным образом основными носителями зарядов. Можно выделить четыре основных механизма токопрохождения: надбарьерный перенос основных носителей заряда (термоэлектронная эмиссия); квантово-механическое туннелирование сквозь барьер; рекомбинация в области пространственного заряда и рекомбинация в нейтральной области (инжекция неосновных носителей).

Существенное отличие МТДП-диодов от диодов с барьерами Шоттки на контакте металл—полупроводник связано с наличием тонкого ди-

электрического слоя. Носители должны туннелировать через потенциальный барьер, образованный диэлектриком, в результате чего ток I, определяемый выражением Кроуэлла-Зи для идеального диода Шоттки, становится существенно меньше для реального диода. Строгое количественное описание этого процесса зависит от конкретной формы барьера. Для учета туннелирования в уравнение Кроуэлла-Зи вводят коэффициент туннельной прозрачности барьера P, считая его не зависящим от приложенного напряжения. Тогда высота потенциального барьера φ_b в МТДП-структуре может быть определена экстраполяцией линейного участка вольт-амперной характеристики (ВАХ) в координатах ($\ln I$, V) к $V = 0$ [2]

$$\varphi_b = kT \ln\left(\frac{A^{**} T^2 P}{I_S}\right), \qquad (1)$$

где $A^{**} \sim 12$ А$^{-1}$·см$^{-2}$·град$^{-2}$ — модифицированная постоянная Ричардсона.

В отличие от идеальных диодов Шоттки и диодов с p-n-переходом обратный ток в диодах Шоттки с промежуточным туннельно-прозрачным диэлектриком никогда не насыщается. При малых напряжениях смещения причиной этого являются силы изображения, из-за которых барьер понижается пропорционально $V^{1/4}$. С ростом напряжения становится существенным механизм понижения барьера из-за падения части приложенного напряжения на промежуточном диэлектрике. При этом ток насыщения будет больше в случае более толстого диэлектрика. Отклонения ВАХ диодов Шоттки с промежуточным туннельно-прозрачным слоем диэлектрика от идеальных, обусловленные перечисленными причинами, описываются коэффициентом идеальности n [2]

$$n = (kT)^{-1}\left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) = \left[1 + \frac{d\Delta\varphi}{dV} + kT\frac{d(\ln A^{**})}{dV}\right]^{-1}, \qquad (2)$$

где $\Delta\varphi$ — понижение барьера вследствие сил изображения.

Были измерены ВАХ МТДП-диодов площадью $2{,}5\cdot10^{-5}$ см^2 из p-КРТ с $x \sim 0{,}2$ при различных температурах в интервале 5—110 К. При температурах вплоть до 100 К все характеристики — диодного типа с отсутствием насыщения обратных ветвей ВАХ. С увеличением температуры при одном и том же смещении прямой и обратный токи возрастают.

Дифференциальное сопротивление при нулевом смещении изменяется от $\sim10^3$ (T = 110 К) до $\sim(3—5)\cdot10^4$ Ом (80 К).

Коэффициент идеальности ВАХ МТДП-диодов, вычисленный в соответствии с формулой (2), составляет 1,4—2,6, а коэффициент туннельной прозрачности барьера промежуточного диэлектрического слоя равен $(3—5)\cdot10^{-7}$.

На рис. 1 показаны ветви обратной ВАХ МТДП-диода из p-КРТ с $x \sim 0{,}2$ вместе с расчетной характеристикой в предположении диффузионно-дрейфового механизма переноса основных носителей заряда.

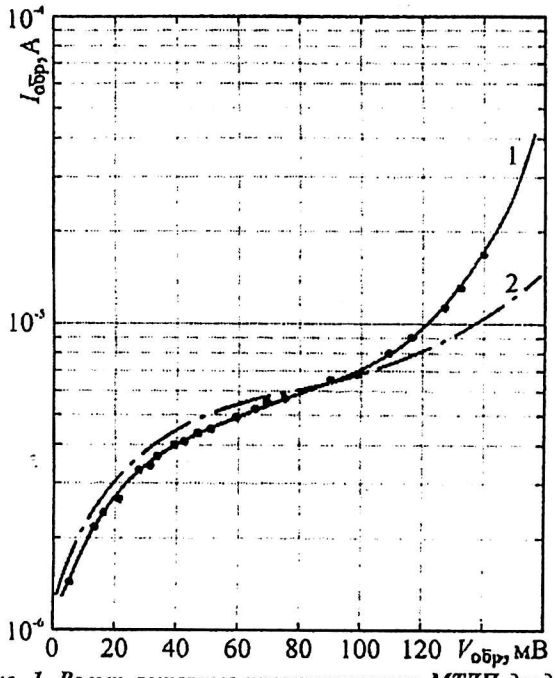

Рис. 1. Вольт-амперные характеристики МТДП-диода из p-$Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ (туннельный диэлектрик — Al_2O_3 толщиной δ = 7 нм, барьерный металл — Mo):
1 — экспериментальная; 2 — рассчитанная в предположении диффузионно-дрейфового механизма переноса носителей

Экспериментальная и расчетная ВАХ близки в области напряжений $V < 100$ мВ. Для $V > 100$ мВ обратный ток растет с напряжением быстрее, чем это следует из расчетной зависимости, что объясняется влиянием эффекта туннелирования через барьер Шоттки.

Близость экспериментальной и расчетной ВАХ подтверждает диффузионно-дрейфовый механизм переноса в МТДП-диодах на основе КРТ p-типа проводимости.

Для туннельных диэлектриков из Al_2O_3 и плазменного фторида (ПФ) коэффициент идеальности возрастает с ростом толщины диэлектрика δ по закону, близкому к

$$n \approx 1 + a\delta.$$

В МТДП-диодах с промежуточным диэлектриком из Al_2O_3 $a \sim 1{,}8\cdot10^{-3}$ нм$^{-1}$, а для плазменного фторида $a \sim 0{,}4\cdot10^{-3}$ нм$^{-1}$.

Минимальная величина $n \sim 1{,}19$ получена для МТДП-диода с промежуточным диэлектриком толщиной $\delta \sim 5$ нм. По-видимому, такие МТДП-диоды ближе всего к идеальным диодам Шоттки из КРТ.

Туннельная прозрачность диэлектриков уменьшается в интервале 10^{-6}—10^{-8} с ростом толщины по закону, близкому к экспоненциальному.

Полное сопротивление МТДП-диода R зависит от приложенного смещения и температуры. На рис. 2 показаны зависимости полного дифференциального сопротивления МТДП-диода из КРТ p-типа с $x \sim 0{,}2$ при различных температурах.

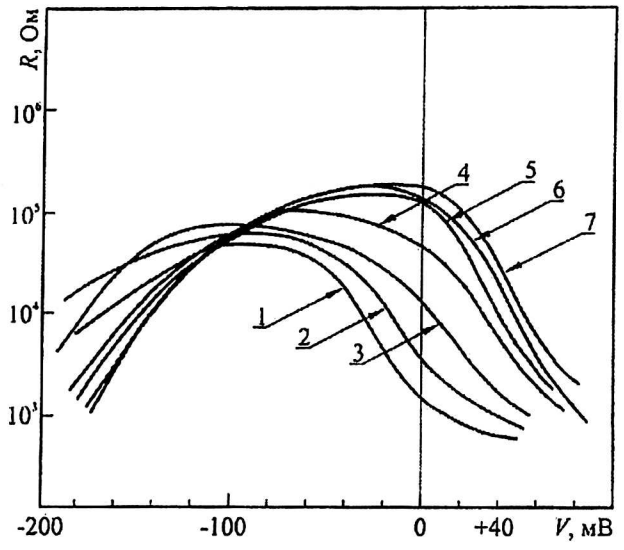

Рис. 2. Зависимость полного дифференциального сопротивления МТДП-диода из p-$Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ от напряжения смещения при нескольких температурах:
1 — T = 110 K; 2 — T = 100 K; 3 — T = 80 K; 4 — T = 50 K; 5 — 30 K; 6 — T = 10 K; 7 — T = 5 K

При обратных смещениях $V_{обр} > 100$ мВ сопротивление заметно падает с возрастанием $V_{обр}$ из-за уменьшения высоты барьера. В области прямых смещений сопротивление R не уменьшается до нуля, а стремится к некоторому не зависящему от напряжения значению, которое является последовательным сопротивлением и складывается из сопротивления объема и сопротивления растекания металлических контактов.

Зависимость дифференциального сопротивления R_0 при нулевом смещении от температуры для МТДП-диодов на основе p-КРТ с $x \sim 0{,}2$ приведена на рис. 3.

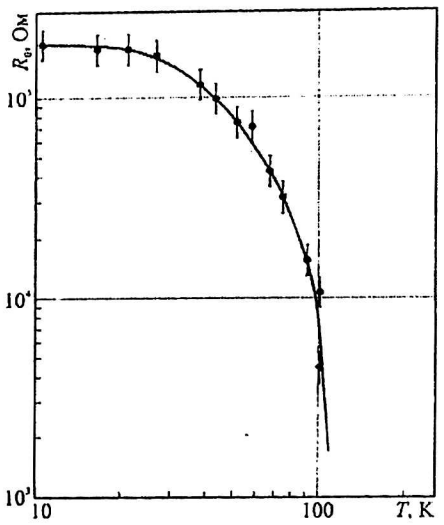

Рис. 3. Температурная зависимость дифференциального сопротивления при нулевом смещении R_0 для МТДП-диода из p-$Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$

В интервале 5—30 K R_0 практически не зависит от температуры, а при $T > 30$ K — убывает с ростом T.

ВАХ МТДП-структур хорошо описываются в рамках модели, предполагающей диффузионно-дрейфовый механизм прохождения тока основных носителей в области пространственного заряда и туннелирование через барьер в промежуточном диэлектрическом слое. Коэффициент идеальности ВАХ составляет 1,2—1,4, туннельная прозрачность исследованных диэлектриков $(3—5)\cdot10^{-7}$ и экспоненциально уменьшается с толщиной.

Зонная структура потенциальных барьеров

Высота потенциальных барьеров определялась в соответствии с формулой (1).

Наличие тонкого промежуточного диэлектрического слоя в МТДП-диодах приводит к двум особенностям зонной структуры барьеров Шоттки: высота барьера при нулевом смещении ниже, чем для идеального диода Шоттки из-за падения части напряжения на промежуточном диэлектрическом слое; высота потенциального барьера зависит от напряжения смещения и уменьшается с возрастанием $V_{см}$.

В табл. 2 приведены высоты потенциальных барьеров, полученные описанным методом.

Таблица 2

Параметры потенциальных барьеров в диодах Шоттки со структурой МТДП на основе КРТ с $x = 0,2$

Подложка	Концентрация осн. примеси, $см^{-3}$	Барьерный металл	Поверхность перед нанесением металла	Высота барьера φ_b,, эВ	Коэффициент идеальности, n	Работа выхода металла из лит. данных, эВ
n-тип	$1 \cdot 10^{15}$	Au	Травленая	0,053	3,1	5,15
n-тип	$1 \cdot 10^{15}$	Ni	"	0,048	2,9	5,15
n-тип	$7 \cdot 10^{14}$	Sn	"	0,038	3,3	4,43
n-тип	$3 \cdot 10^{14}$	In	"	0,040	3,2	4,05
p-тип	$1 \cdot 10^{16}$	In	Пассивирована Al_2O_3 (~5 нм)	0,101	1,42	4,05
p-тип	$3 \cdot 10^{15}$	Ti	Пассивирована ПФ (~8 нм)	0,101	1,21	4,08
p-тип	$1 \cdot 10^{16}$	Mo	Пассивирована Al_2O_3 (~5 нм)	0,702	1,23	4,23
p-тип	$6 \cdot 10^{15}$	Al	Пассивирована Al_2O_3 (~7 нм)	0,067	1,37	4,21
p-тип	$1 \cdot 10^{16}$	Cr	Пассивирована Al_2O_3 (~5 нм)	0,029	1,32	4,47

Высота потенциальных барьеров, изготовленных осаждением металлов непосредственно на травленую поверхность КРТ, заметно ниже, чем в структурах с промежуточным диэлектрическим слоем. Зависимость высоты барьеров φ_b от работы выхода металла практически отсутствует. Это свидетельствует о высокой плотности поверхностных состояний N_{SS} на границе раздела металл—полупроводник. Действительно при $N_{SS} \sim 5 \cdot 10^{13}$ $эВ^{-1} \cdot см^{-2}$ уровень Ферми на поверхности "фиксирован" в зоне поверхностных состояний, а высота барьера не зависит от работы выхода металла.

Диоды Шоттки с барьерами металл—полупроводник характеризуются коэффициентом идеальности $n \sim 3$.

В случае предварительной пассивации поверхности тонким диэлектрическим слоем из Al_2O_3 или ПФ коэффициент идеальности значительно ближе к 1 и равен 1,2—1,4. Плотность поверхностных состояний здесь намного ниже и составляет величину $N_{SS} \sim 2 \cdot 10^{11}$ $эВ^{-1} \cdot см^{-2}$. Для полупроводника p-типа высота барьеров при этом начинает заметно зависеть от работы выхода металла (рис. 4).

Зонные структуры МТДП-диодов с барьерами Шоттки в системах Cr—Al_2O_3 (5 нм) — p-КРТ и Mo—Al_2O_3 (5 нм) — p-КРТ на основе твердых растворов с $x = 0,2$, построенные на основе данных табл. 2, показаны на рис. 4.

Высота барьера при использовании молибдена в качестве барьерного металла заметно больше половины ширины запрещенной зоны КРТ. Поэтому в приповерхностной области полупроводниковой подложки p-типа содержится значительное количество неосновных носителей заряда (электронов). При прямых смещениях эти носители могут диффундировать в нейтральную область полупроводника. Это приводит к инжекции неосновных носителей заряда.

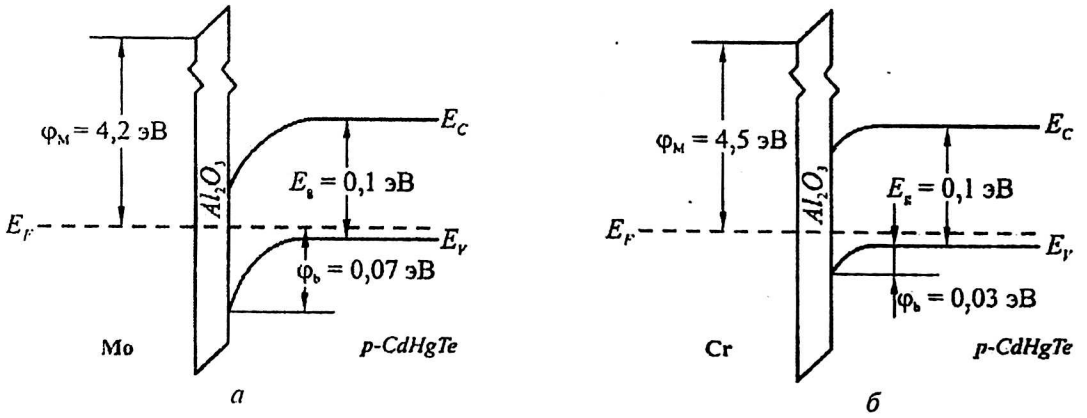

Рис. 4. Зонная структура потенциальных барьеров в МТДП-диодах с барьерами Шоттки на основе p-$Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$:
а — Mo-Al_2O_3 – p-КРТ; *б* — Cr-Al_2O_3 – p-КРТ

Коэффициент инжекции электронов γ_I можно представить в виде [3]

$$\gamma_I = \frac{I_n}{I_n + I_p} \approx \frac{I_n}{I_P} \approx \frac{qD_n n_i^2}{N_A L_n I_S},$$

где I_n и I_p — электронная и дырочная компоненты полного тока; D_n — коэффициент диффузии; L_n — длина диффузионного смещения электронов; n_i — собственная концентрация; I_S — ток насыщения диода.

Для p-КРТ, принимая концентрацию акцепторов $N_A \sim 10^{15}$ см$^{-3}$, время релаксации электрона $\tau_n \sim 5 \cdot 10^{-7}$ с, концентрацию собственных носителей $n_i \sim 4{,}4 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n \sim 5 \cdot 10^4$ см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$ и используя экспериментальные значения плотности тока насыщения $I_S \sim 2{,}6 \cdot 10^{-3}$ А·см$^{-2}$, расчетная оценка величины γ_I по последней формуле дает значение 0,1—0,3.

Это означает, что при использовании умеренно легированных подложек ($p_0 \sim 10^{15}$ см$^{-3}$) МТДП-диоды с высотой потенциальных барьеров Шоттки $\varphi_b \sim 0{,}1$ эВ можно использовать в качестве элементов, эффективно инжектирующих неосновные носители заряда, например, для создания сток-истоковых областей полевых транзисторов на основе твердых растворов кадмий—ртуть—теллур и др.

Высота барьера при использовании хрома в качестве барьерного металла, напротив, невелика и не превышает ~ 0,3 E_g. Такие барьеры не могут обеспечить эффективную инжекцию электронов в МТДП-диодах на основе p-КРТ.

Таким образом, для создания МТДП-диодов, пригодных для использования в качестве элементов, инжектирующих неосновные носители в p-КРТ, целесообразно применять металлы типа Ti, In, Al, а в n-КРТ более перспективны Au, Ni, Cr.

Заключение

Исследованы потенциальные барьеры в диодах Шоттки со структурой МТДП на основе узкозонных твердых растворов КРТ со сверхтонким диэлектрическим слоем толщиной 5—7 нм, созданным методом высокочастотного магнетронного распыления мишени из Al_2O_3 в кислородсодержащей плазме, либо методом плазменного фторирования поверхности КРТ во фторсодержащей плазме.

ВАХ МТДП-структур хорошо описываются в рамках модели, предполагающей диффузионно-дрейфовый механизм прохождения тока основных носителей в области пространственного заряда и туннелирование через барьер в промежуточном диэлектрическом слое. Коэффициент идеальности ВАХ составляет 1,2—1,4, туннельная прозрачность исследованных диэлектриков — $(3—5) \cdot 10^{-7}$ и экспоненциально уменьшается с толщиной.

Построены энергетические диаграммы потенциальных барьеров Шоттки в структурах металл — туннельный диэлектрик — p-$Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$.

При использовании умеренно легированных подложек ($p_0 \sim 10^{15}$ см$^{-3}$) МТДП-диоды с высотой потенциальных барьеров Шоттки $\varphi_b \sim 0{,}1$ эВ можно использовать в качестве элементов, эффективно инжектирующих неосновные носители заряда, например, для создания сток-истоковых областей полевых транзисторов на основе твердых растворов кадмий—ртуть—теллур и др.

Литература

1. *Nemirovsky Y., Yoshen R., Kidron I.* The interface of plasma-anodized $Hg_{1-x}Cd_xTe$//Journ. Appl. Phys., 1982. V. 53. № 7. P. 4888—4895.
2. *Родерик Э. Х.* Контакты металл—полупроводник/Пер. с англ. под ред. Степанова Г. В. — М.: Радио и связь, 1982.
3. *Као К., Хуанг В.* Перенос электронов в твердых телах. — М.: Мир, 1984.
4. *Зи С. М.* Физика полупроводниковых приборов/Пер. с англ. под ред. Суриса Р. А. — М.: Мир, 1984.

The properties of Schottky barrier structures with metal-tunnel transparent dielectric p-$Cd_xHg_{1-x}Te$

V. Damnjanovič
Faculty of Mining and Geology, University, Belgrade, Yugoslavia

V. P. Ponomarenko
RD & P Center "Orion", Moscow, Russia

Potential barriers in Schottky diodes with metal-tunnel transparent dielectric based on $Cd_xHg_{1-x}Te$ with x ~0,2, have been studied. We used In, Tn, Mo, Al and Cr as metal barriers. Superthin dielectric, Al_2O_3 and fluorine plasma films were coated between surface of $Cd_xHg_{1-x}Te$ and metal.