

СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ДИОДОВ ИЗ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ

С. Н. Макаимовский, И. П. Равокатова, В. М. Салман,
С. А. Лыман, М. А. Селезнева

УДК 621.382.2

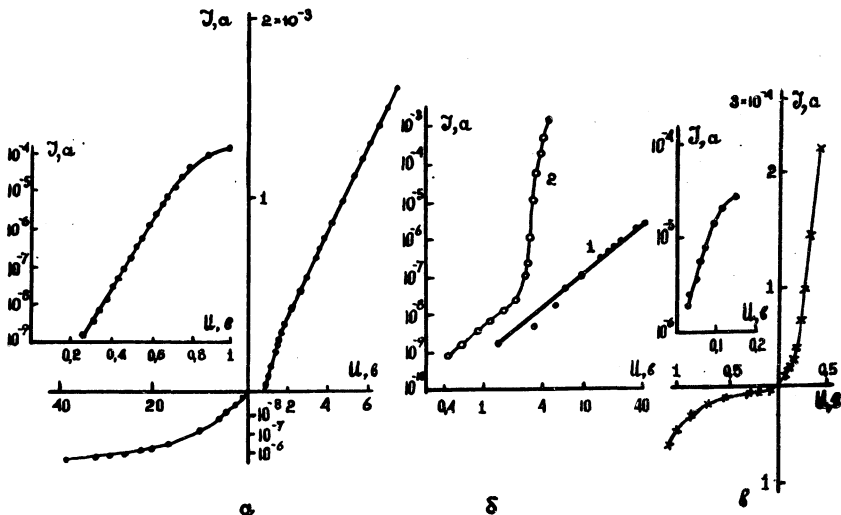
Методом сканирующего электронного зонда и измерения вольт-амперных и вольт-емкостных характеристик изучены свойства эпитаксиальных диодов из теллурида кадмия.

Теллурид кадмия является перспективным материалом для создания эффективных детекторов γ -квантов, люминесцентных диодов, высокочастотных модуляторов света. Однако большинство исследований CdTe ведутся на монокристаллическом материале. Свойства эпитаксиального теллурида кадмия мало изучены. В настоящее время известна только одна работа, в которой исследовались диоды, полученные эпитаксией CdTe из растворов /1/.

В данной работе р-п переходы были выращены методом газовой эпитаксии в квазизамкнутом объеме. В качестве подложки использовался монокристаллический теллурид кадмия р-типа проводимости с концентрацией дырок $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Перед процессом выращивания подложки механически полировались. Шихтой служил поликристаллический теллурид кадмия стехиометрического состава. Для выращивания слоев электронного типа проводимости в шихту добавлялся индий или хлор в виде CdCl_2 . Состав паровой фазы в реакторе и связанная с ним величина отклонения состава от стехиометрического контролировались с помощью дополнительного источника кадмия. Толщина выращиваемых слоев составляла 50–100 мкм. Данные рентгеноструктурного анализа указывали на высокую степень монокристаллического совершенства выращиваемых пленок.

Полученные пленки были n-типа проводимости. Концентрация электронов в них, измеренная по вольт-емкостным характеристикам поверхностно-барьерных диодов, была $10^{15} + 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Контакты изготовлялись сплавлением In в n-пленку и нанесением золота из AuCl_3 на p-подложку.

Вольт-амперные характеристики полученных диодов приведены на рис. I и показывают, что напряжение отсечки составляло 0,7 в, сопротивление при нулевом смещении было 10^8 ом, последовательное сопротивление $R = 500-3000$ ом. Большое последовательное сопротивление обусловлено большим сопротивлением контакта p-CdTe-золото.



Р и с. I. Вольт-амперные характеристики диодов. а) ВАХ диодов типа А. Площадь диода $3,6 \text{ мм}^2$. б) Обратные ветви ВАХ диодов типа А (кривая 1) и типа В (кривая 2). в) ВАХ диода типа С. Площадь диода 6 мм^2 . В верхней левой части рис. I (а) и I (в) приведены прямые ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе

Вольт-амперные характеристики диодов в области прямых смещений 0,2-0,7 в можно представить в виде

$$J = J_0 \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right).$$

Согласно теории Саа-Нойса-Шокли /2/ такой вид вольт-амперной характеристики соответствует случаю, когда основным механизмом протекания тока через p-n переход является рекомбинация носителей тока в области объемного заряда. При этом /3/

$$J = \frac{en_1 d}{\tau} \frac{kT}{\varphi_0 - eU} \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right),$$

где n_1 - собственная концентрация носителей в теллуриде кадмия, d - ширина p - n перехода, $\tau = (\tau_p \tau_n)^{1/2}$, τ_p и τ_n - времена жизни дырок и электронов в сильно легированном материале. Из измерений емкости $d = 2 \div 3 \cdot 10^{-4}$ см. Время жизни τ , вычисленное для p - n переходов с легированной индием n -областью (диоды типа А) составляло 10^{-8} - 10^{-7} сек, при легировании n -области хлором (диоды типа В) время жизни было $5 \cdot 10^{-10}$ сек. На рис. I (б) приведены обратные ветви вольт-амперных характеристик диодов типа А (кривая 1) и типа В (кривая 2). Для диодов типа А в большой области напряжений $J \sim U^2$. В диодах типа В при малых обратных смещениях $J \sim U^2$, а при напряжениях 2-5 в. наблюдается резкий рост тока. Однако подробно механизм протекания обратного тока не изучался.

На частоте 8 кГц были измерены вольт-емкостные характеристики диодов. При малых напряжениях $J \sim C^{-n}$, где $n = 2,5 \div 3$. При больших смещениях падение емкости с увеличением напряжения происходит медленнее. Аналогично работе /4/, такой ход $C - U$ - характеристики можно объяснить ионизацией примесных центров электрическим полем.

С целью исследования дефектов кристаллической решетки в области пространственного заряда p - n перехода были изучены спектральные зависимости фототоков короткого замыкания. В примесной области при 300°K наблюдается пик с максимумом 1,46 эв, при 78°K наблюдаются пики фототока при энергиях фотонов 1,55 эв и 1,4 эв. Эти пики, очевидно, соответствуют переходам электронов с уровней $E_v + 0,05$ эв и $E_v + 0,2$ эв в зону проводимости. Аналогичные пики в спектрах электролюминесценции эпитаксиальных диодов из CdTe наблюдались в работе /1/.

На части диодов (диоды типа С) напряжение отсечки равнялось 0,2 в, сопротивление при нулевом смещении 10^4 ом (рис. Iв). Малые величины напряжения отсечки и сопротивления диодов этой группы, вероятно, связаны с туннелированием носителей по примесным состояниям в области объемного заряда p - n переходов.

Для определения толщины полученных эпитаксиальных пленок, а также глубины залегания p - n перехода относительно границы раз-

дела пленка-подложка использовался растровый электронный микроскоп МЭР-2 /5/ с приставкой, позволяющей получить одновременно изображение в наведенном токе и обратно рассеянных электронах. Этот метод /6/ дает возможность изучать форму и положение перехода, выявлять детали и дефекты структуры, а также определять диффузионные длины неосновных носителей тока вблизи перехода /7/.

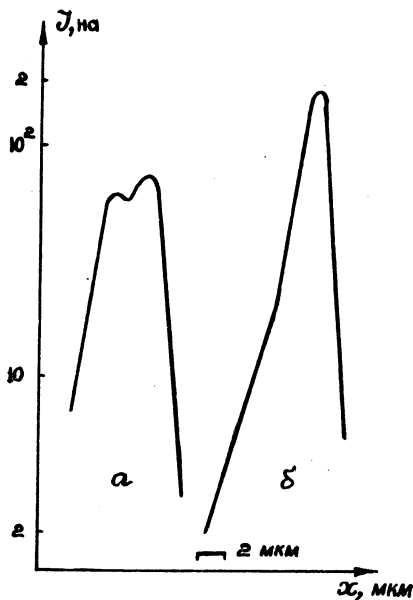
Для исследования были отобраны образцы типа А (образец 1) и типа С (образец № 2), на которых приготавлился скол, перпендикулярный плоскости р-п перехода. На обоих типах образцов р-п переход оказался расположенным в толще образца за границей раздела пленка-подложка. Для образца 1 глубина р-п перехода составляла 175 мкм от края образца при толщине эпитаксиальной пленки 75 мкм, а для образца 2 - 120 мкм при толщине эпитаксиальной пленки 60 мкм. На обоих типах образцов отсутствовали микрополя на границе раздела пленка-подложка, что свидетельствовало о хорошей подготовке поверхности перед наращиванием эпитаксиальной пленки.

Измерение длин диффузии проводилось на специально сконструированной приставке к микроанализатору МЭ-46. Регистрировался ток, индуцированный электронным зондом в короткозамкнутой цепи р-п перехода при сканировании в направлении, перпендикулярном к р-п переходу со скоростью 10 мкм/мин через интервалы расстояния 1 мкм. Диаметр электронного зонда контролировался и не превышал в наших измерениях 0,5 мкм. Мощность используемого электронного зонда была 10^{-6} вт, что обеспечивало малый уровень инжекции. Расчитанное по закону ослабления для электронов /8/ положение центра источника электронно-дырочных пар соответствовало для нашего режима 0,3 мкм. Генерируемые этим источником пары создают диффузионный ток через переход, вычисляемый из распределения плотности избыточных носителей в зависимости от расстояния области возбуждения от перехода. В том случае, когда расстояние от контакта до перехода много больше длины диффузии неосновных носителей и скорость поверхностной рекомбинации $S = 0$, для тока через переход имеем:

$$J(x) = - e g \exp(-x/L),$$

где g - число пар носителей, генерируемых в единицу времени, e - заряд электрона, x - расстояние зонда от перехода, L - длина диффузии неосновных носителей. При $x \sim L$ $J(x)$ отличается от

экспоненты и зависит от размеров источника электронно-дырочных пар. В выбранном нами режиме, при любой скорости поверхностной рекомбинации ошибка в определении L по приведенной формуле меньше 20%. Положение максимума $J(x)$ соответствует глубине залегания p - n перехода, т.е. толщине диффузионного слоя.



Р и с. 2. Наведенные токи в цепи короткозамкнутого p - n перехода
 а) $V_{\text{уск}} = 10 \text{ кв.}$, $i_{\text{поги}} = 0,1 \text{ на}$; б) $V_{\text{уск}} = 15 \text{ кв}$ $i_{\text{поги}} = 0,1 \text{ на}$

На рис. 2 (а,б) даны кривые зависимости $J(x)$ для образцов I и 2. В случае образца I (рис.2а) на кривой $J(x)$ наблюдалось два максимума, расстояние между которыми соответствует ширине переходной области p - n перехода. Мы считали, что в данном случае была получена p - i - n структура с протяженностью i -области $d = 2,5 \text{ мкм}$. Возможность оценки протяженности i -области электронно-зондовым методом связана с малым по сравнению с d диаметром зонда. Максимумы на кривой соответствуют p - i и i - n переходам, которые удается разрешить из-за $L_n, L_p < d$ и d боль-

шей, чем область рассеяния электронов, что обусловлено выбором режима ($V_{\text{уск}} = 10$ кв). Длины диффузии для этого образца были $L_n = 1,4$ мкм + 0,3 мкм, $L_p = 0,9 + 0,2$ мкм.

Для диодов группы С толщина переходной области p-n перехода меньше или сравнима с диаметром зонда и определить ее не представлялось возможным, а длины диффузии электронов и дырок были: $L_n = 2,6 \pm 0,5$ мкм и $L_p = 1,1 + 0,2$ мкм.

Различие толщин p-n переходов в образцах № 1 (диоды типа А и В) и № 2 (диоды типа С) можно связать с различием технологических режимов, в которых они были получены. Перед выращиванием диодов типа А и В подложки сильно протравливались за счет увеличения нагрева. Диоды типа С выращивались при постоянной тепловой мощности печи.

В заключение авторы благодарят академика Б. М. Вула за обсуждение полученных результатов.

Поступила в редакцию
14 октября 1974 года.

Л и т е р а т у р а

1. Н. Ishida, К. Tanaka. J. Japan. Soc. Appl. Phys., 41, supplement, 117 (1972).
2. S. C. T. Sah, R. N. Noyse, W. Shockley. Proc. I. R. E. 45, 1228 (1957).
3. Г. Е. Пякус. Основы теории полупроводниковых приборов. М., Наука, 1965 г., стр. 191.
4. Л. И. Калугина, Е. Д. Кухтанов, П. С. Киреев. Радиотехника и электроника, 15, 2623 (1970).
5. Д. В. Фетисов, Ю. М. Кушнир, Е. Б. Постников. Изв. Академии Наук СССР, серия физическая, 36, 1861 (1972).
6. Г. В. Спивак, Г. В. Сапарин, М. В. Быков. УФН, 99, 635 (1969).
7. D. B. Wittry, D. F. Kyser. J. Appl. Phys., 36, 1387 (1965).
8. G. Dupouy. Compt. Rend., 260, 6055 (1965).