

Глубокие примесные состояния и собственные дефекты в фоторефрактивных кристаллах $Cd_{1-x}Fe_xTe$

© Ю.П. Гнатенко, Р.В. Гамерник, И.А. Фарина, П.И. Бабий

Институт физики Академии наук Украины,
252022 Киев, Украина

(Поступила в Редакцию 5 августа 1997 г.
В окончательной редакции 22 января 1998 г.)

Изучены низкотемпературные оптические и фотоэлектрические свойства кристаллов $Cd_{1-x}Fe_xTe$ ($x = 0.0038$), что позволило получить информацию об оптическом качестве таких кристаллов, природе их неоднородности, а также обнаружить глубокие примесные центры Fe^{2+} и однократно заряженные акцепторные комплексы. Установлен анизотропный характер таких комплексов, которые включают двукратно заряженную вакансию кадмия и ионизированный донор. Показано, что их анизотропия определяется природой донорного атома и его месторасположением в кристаллической решетке (на катионном или анионном узле). Исходя из наличия в исследуемых кристаллах реальных глубоких примесных центров и акцепторных комплексов предложен механизм возникновения в них фоторефрактивного эффекта. Впервые отмечена возможность проявления анизотропии фоторефрактивных свойств кристаллов $CdTe$, содержащих примесные $3d$ -элементы, не связанной с анизотропией электрооптического эффекта.

Полупроводниковые кристаллы $CdTe$, легированные элементами переходных металлов группы железа ($3d$ -элементы), относятся к наиболее перспективным фоторефрактивным материалам для ближней ИК-области спектра. Так, электрооптические коэффициенты $CdTe$ в 3 раза, а чувствительность в 2 раза превышает соответствующие значения кристаллов $GaAs$ и InP [1]. Такое увеличение данных параметров квадратично проявляется в дифракционной эффективности фоторефрактивной решетки. Дополнительным преимуществом таких материалов по сравнению с оксидными кристаллами $BaTiO_3$ и $LiNbO_3$, исследование фоторефрактивных свойств которых в настоящее время проводится достаточно широко, является их намного более быстрое время отклика благодаря высокой подвижности фотовозбужденных носителей в полупроводниковых кристаллах. Однако при исследовании фоторефрактивных свойств таких материалов не учитываются их оптическое качество, наличие реальных глубоких примесных центров и собственных структурных дефектов, их природа, энергетическая и кристаллическая структура. Поэтому вопрос, касающийся микромеханизма фоторефрактивного эффекта в кристаллах $CdTe$, содержащих $3d$ -элементы, в настоящее время остается открытым, что, безусловно, тормозит исследования, направленные на получение таких материалов с определенными и контролируемыми фоторефрактивными свойствами.

Введение в кристаллы $CdTe$ $3d$ -элементов приводит к образованию глубоких примесных уровней [2]. В результате фотоионизации таких примесных центров возникают свободные носители, диффузия которых вызывает возникновение поля пространственного заряда и соответственно изменение показателя преломления вследствие электрооптического эффекта. Наряду с этим ионизированные глубокие примесные центры могут выступать в качестве ловушек для фотовозбужденных носителей. Поэтому роль примесных состояний $3d$ -элементов является определяющей в проявлении

фоторефрактивных свойств полупроводниковых материалов. Таким образом, получение наиболее полных сведений об энергетической и кристаллической структуре глубоких примесных центров и структурных дефектов с учетом возможного образования в кубических кристаллах $CdTe$ различных анизотропных комплексов является очень важным не только для установления микромеханизма фоторефрактивной записи информации в таких материалах, но также и для выбора наиболее оптимальной ориентации кристалла при осуществлении такой записи.

Ранее было показано [2,3], что в случае кристаллов $CdTe$, содержащих $3d$ -элементы, эффективным методом получения указанных выше сведений являются комплексные низкотемпературные исследования их оптических свойств и спектров фотогальванического тока (ФГТ). В последнем случае при возбуждении направленным пучком света имеющиеся в кристаллах некубические центры, отличающиеся своей ориентацией, будут возбуждаться неодинаково [4]. Поэтому следует ожидать, что интенсивности полос фотоионизационных переходов в спектрах ФГТ для разных групп центров будут неодинаковы. Это позволяет использовать такие измерения для обнаружения и исследования некубических примесных центров и сложных собственных дефектов в кубических кристаллах $CdTe$.

В настоящей работе проведены низкотемпературные исследования оптических и фотоэлектрических свойств кристаллов $Cd_{1-x}Fe_xTe$ с целью получения сведений, касающихся оптического качества данных кристаллов и установления природы их неоднородности, а также обнаружения анизотропных примесных центров и собственных структурных дефектов, определения их природы и положения энергетических уровней. На основе полученных результатов впервые для кристаллов $CdTe$, содержащих $3d$ -элементы, предложен механизм возникновения в них фоторефрактивного эффекта и его анизотропии, связанной с наличием в кристаллах анизотропных центров.

1. Методика эксперимента

Исследуемые кристаллы $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ получены методом Бриджмена. При выращивании таких кристаллов наряду с атомами железа добавлялось соответствующее количество атомов теллура [3]. Концентрация примеси определена с помощью рентгеновского микроанализатора MS-46 и составляла $x = 0.0038$. Ориентация образцов осуществлялась по дифракционной картине рентгеновских лучей.

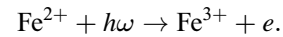
Спектры поглощения и ФГТ измерялись с помощью установки КСВУ-23. Для низкотемпературных исследований кристаллы помещались в криостат, температура в котором поддерживалась с точностью ± 0.1 К. Для возбуждения спектров ФГТ использовалась лампа КГМ-250 со стабилизированным источником питания, а для регистрации — вольтметр-электронметр В7-30.

Спектры ФГТ измерялись на плоскопараллельных образцах, толщина которых d удовлетворяла условию $kd \gg 1$, т.е. свет поглощался на передней поверхности кристалла. Электроды наносились в виде сетки на естественные сколы кристалла (переднюю и заднюю грани), расположенные перпендикулярно направлению распространения света, и проверялись на омичность. При освещении таких образцов вследствие неоднородного распределения по глубине кристалла избыточных неосновных носителей заряда возникает диффузионный ток, направленный перпендикулярно поверхности кристалла (поскольку поперечное сечение падающего света было однородным, это исключало возникновение диффузии носителей перпендикулярно направлению распространения света). В результате установления равновесия в изолированном образце возникает разность потенциалов между освещенной и затемненной поверхностями кристалла, которая определяет фотоэдс Дембера. В случае проводимых нами измерений входное сопротивление электрометра было намного меньше удельного сопротивления образцов, в результате чего в данном эксперименте измерялся диффузионный ток, близкий к току короткого замыкания. Направление такого тока определяется направлением градиента концентрации носителей, т.е. направлением распространения света. Образцы облучались неполяризованным монохроматическим светом, поэтому учет поляризации возбуждающего света, которая возникает при использовании монохроматора, в работе не проводился. Полярность фотогальванического (фотодиффузионного) тока определялась знаком заряда, возникающего на передней (освещенной) поверхности исследуемого образца, и являлась противоположной знаку возбуждаемых носителей. Поэтому в данном случае измерение ФГТ позволяло определять не только энергию, но также и тип фотопереходов. Спектры ФГТ нормировались на одинаковое количество падающих квантов.

Спектры фотолюминесценции измерялись с помощью спектрометра СДЛ-1. Для возбуждения использовался аргоновый лазер ЛГН-404, а в качестве фотоприемника — ФЭУ-62.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Из рис. 1 видно, что при гелиевой температуре в области прозрачности кристалла $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ (около 1.0 eV) наблюдается фоновое поглощение, величина которого составляет 2.0 cm^{-1} . Поглощение в области $1.05 < E < 1.25$ eV, согласно [3], связано со следующим фотоионизационным переходом:



Полоса поглощения при $T = 4.5$ К (кривая 1 на рис. 1) вблизи края поглощения ($1.25 < E < 1.48$ eV) зависит от концентрации примеси и соответствует внутрицентровому поглощению между ${}^5E^5D-{}^3T_1({}^3H)$ -состояниями примесного иона Fe^{2+} [3]. При $T = 300$ К (кривая 2 на рис. 1) полоса сильно размывается и перекрывается с краем собственного поглощения кристалла CdTe.

Следует отметить, что фоновое поглощение в основном обусловлено рассеянием света на неоднородностях кристалла, которые возникают в результате легирования CdTe. Известно [5], что экситонные возбуждения весьма чувствительны к наличию в кристаллах различного типа дефектов и примесей. Поэтому сам факт наблюдения низкотемпературных экситонных спектров отражения и фотолюминесценции (рис. 2) свидетельствует о достаточно высоком оптическом качестве исследуемых образцов.

Анализ наблюдаемого спектра фотолюминесценции обнаруживает проявление линии излучения экситонов на мелком акцепторе (A^0X -линия), который представляет собой сложный однократно заряженный центр, состоящий из двукратно заряженной вакансии кадмия (V_{Cd}^{2-}) и однократно ионизированного донора (D^+), т.е. ($V_{\text{Cd}}^{2-}-D^+$)-центр [6]. Особенности в виде перегибов, которые видны на длинно- и коротковолновом крыльях A^0X -линии, свидетельствуют о наличии в кристаллах

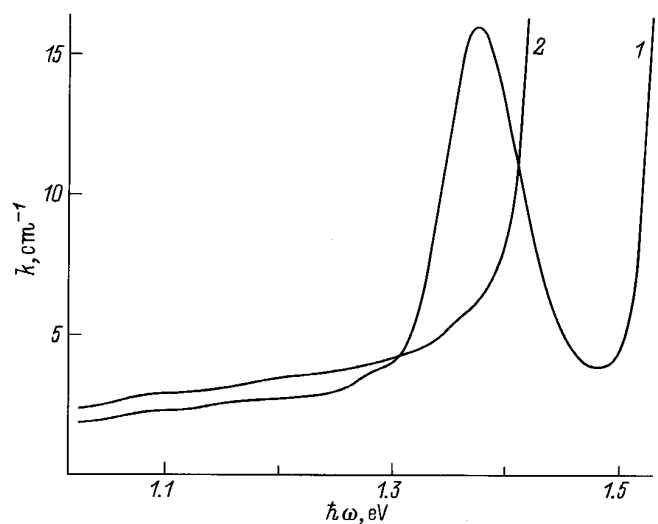


Рис. 1. Спектр поглощения кристаллов $\text{Cd}_{0.9962}\text{Fe}_{0.0038}\text{Te}$ при $T = 4.5$ (1) и 300 К (2).

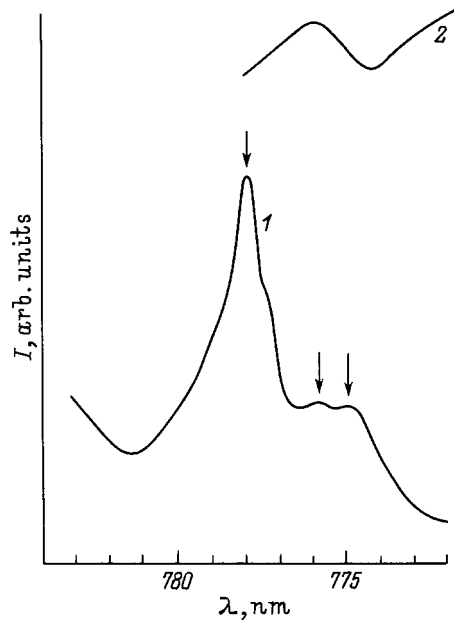


Рис. 2. Спектр фотолюминесценции (1) и экситонного отражения (2) кристаллов $\text{Cd}_{0.9962}\text{Fe}_{0.0038}\text{Te}$ при $T = 4.5 \text{ K}$.

$\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ других мелких акцепторных уровней с различной энергией связи. В спектре видна также линия излучения экситонов, связанных на нейтральных донорах (D^0X -линиях). Следует отметить, что мелкие донорные и акцепторные состояния, которые проявляются в спектрах излучения связанных экситонов, сильно влияют на электрические свойства кристаллов CdTe [7]. Поэтому A^0X - и D^0X -линии излучения можно рассматривать как индикаторы электрических свойств кристаллов, а их интенсивности пропорциональны концентрации мелких акцепторов и доноров соответственно. Как следует из рис. 2, D^0X -линия является размытой. Это обусловлено ее перекрытием с более коротковолновой линией излучения экситонов, локализованных на флуктуациях потенциала кристаллической решетки (M^0X -линия), которые возникают в результате неоднородного распределения примесных центров железа в кристалле CdTe . Следствием такого разупорядочения является также некоторое уширение экситонной полосы отражения по сравнению с легированным кристаллом. Другой причиной уширения экситонной полосы отражения является рассеяние экситонов на примесном потенциале [8]. Наблюдаемое коротковолновое (по сравнению с легированным CdTe) смещение экситонной полосы отражения (около 5 meV) свидетельствует об образовании полупроводниковых твердых растворов замещения — полумангнитных полупроводников $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$.

Неоднородное распределение примесных атомов железа в исследуемых кристаллах в определенной мере связано с образованием в них магнитоупорядоченных кластеров. Такое заключение следует из результатов измерения низкотемпературных оптических спектров,

магнитной восприимчивости и ее анизотропии [3,9]. Образование таких кластеров зависит от концентрации атомов железа. Так, при концентрации $N_{\text{Fe}} < 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ($x = 0.0013$) ионы Fe в основном входят в кристаллы CdTe как одиночные ионы и находятся в двухзарядовом состоянии. Магнитная восприимчивость таких кристаллов описывается законом Кюри-Вейсса, образцы являются магнитоизотропными. При концентрации $N_{\text{Fe}} > 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, температурная зависимость парамагнитной составляющей восприимчивости отклоняется от закона Кюри-Вейсса, возникает некоторая магнитная анизотропия. Такие изменения обусловлены возникновением в кристаллах $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ магнитоупорядоченных кластеров, которые также присутствуют в исследуемых в работе кристаллах, поскольку концентрация атомов железа составляет $x = 0.0038$. При таких концентрациях примесные ионы железа могут находиться кроме двухзарядового также и в других зарядовых состояниях [3].

Таким образом, проведенные низкотемпературные исследования оптических свойств кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ позволили получить информацию об однородности кристаллов, наличии в них глубокого примесного уровня ионов Fe^{2+} , а также о мелких акцепторных и донорных дефектах, которые в основном определяют электрические свойства данных кристаллов. Сведения об энергетическом положении уровней таких примесных центров и собственных дефектов по отношению к энергетическим зонам кристалла могут быть получены в результате измерения спектров ФГТ [10,11].

В спектрах ФГТ исследуемых кристаллов (рис. 3) полосы положительной полярности обусловлены фотоионизационными переходами электронов с уровней примесей или дефектов в зону проводимости, а полосы отрицательной полярности — возбуждением электронов валентной зоны на дискретные уровни, расположенные в запрещенной зоне кристалла (фотоионизация дырок с примесных уровней в валентную зону) [2]. При распространении света вдоль $\langle 110 \rangle$ -направления спектр ФГТ состоит из двух полос положительной полярности, положение максимумов которых соответствует 1.485 и 1.585 eV . Высокоэнергетическая полоса обусловлена диссоциацией экситонов и свидетельствует об электронном типе проводимости при возбуждении кристалла светом вдоль $\langle 110 \rangle$ -направления. Полоса в области 1.500 eV ранее наблюдалась в кристаллах CdTe , легированных также и другими $3d$ -элементами (V [10], Ni [11] и Te [12]). Это свидетельствует о том, что возникновение данной полосы обусловлено наличием в кристалле собственных структурных дефектов, а знак полосы указывает на фотоионизацию электронов с акцепторного уровня в зону проводимости. Поскольку интенсивная полоса 1.485 eV наблюдается только для $\langle 110 \rangle$ -направления, данный акцепторный уровень принадлежит анизотропному центру, ось которого совпадает с $\langle 110 \rangle$ -направлением в кристалле. При изучении спектров фотолюминесценции связанных экситонов, результаты которого приведены

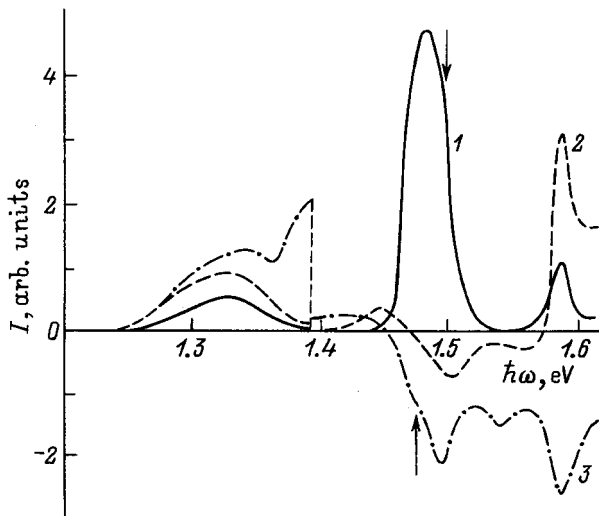


Рис. 3. Спектр фотогальванического тока кристаллов $\text{Cd}_{0.9962}\text{Fe}_{0.0038}\text{Te}$ при $T = 78 \text{ K}$. 1–3 — распространение света вдоль $\langle 110 \rangle$ -, $\langle 100 \rangle$ -, $\langle 111 \rangle$ -направлений соответственно.

выше, было установлено, что в исследуемых кристаллах $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ основным мелким акцептором является однократно заряженный $(V_{\text{Cd}}^{2-} - D^+)$ -центр. Следует отметить, что ранее в работе [13] методом электропоглощения было обнаружено наличие сложного центра с участием вакансий кадмия и донора, связанного с примесью хлора. Поскольку атомы хлора замещают вакансии теллура, ориентация такого комплекса соответствовала $\langle 111 \rangle$ -направлению. В нашем случае в качестве ионизированного донора, по-видимому, выступают неконтролируемые примеси атомов III группы (Ga, In или Al), расположенные на месте катионных узлов вдоль $\langle 110 \rangle$ -направления. Поэтому полоса 1.485 eV обусловлена фотоионизационными переходами с участием данного анизотропного центра.

Как видно из рис. 3, независимо от направления распространения света в спектре ФГТ наблюдается широкая полоса положительной полярности с максимумом вблизи 1.330 eV, которая по энергии совпадает с положением полосы внутрицентрового поглощения между ${}^5E({}^5D)$ - и ${}^3T_1({}^3H)$ -состояниями иона Fe^{2+} [3]. Поскольку энергия прямой фотоионизации ионов Fe^{2+} составляет 1.08 eV, указанное возбужденное состояние примесного центра находится в резонансе с зоной проводимости. Появление сигнала ФГТ в этой области спектра обусловлено автоионизацией электронов с возбужденного уровня примеси в зону проводимости. Следствием проявления такого резонанса является наблюдение широкой бесструктурной асимметричной полосы внутрицентрового поглощения (кривая 1 на рис. 1). Поскольку полоса 1.330 eV проявляется для различных направлений распространения света, очевидно, что она связана с возбуждением изолированных примесных ионов железа. Как следует из рис. 3 (кривая 3), в спектре ФГТ наблюдается также широкая полоса в области 1.400 eV, которая может быть

отнесена к анизотропному центру, ось которого направлена вдоль $\langle 111 \rangle$ -направления. Таким центром может быть комплекс, включающий ион железа и донор, расположенный на месте анионного узла, возникновение которого, возможно, связано с наличием в кристалле неконтролируемых атомов хлора.

Из рис. 3 видно, что наблюдаемая в спектре ФГТ полоса отрицательной полярности 1.495 eV при распространении света вдоль $\langle 111 \rangle$ -направления является сложной. На ее длинноволновом крыле наблюдается перегиб (отмечен стрелкой на кривой 3), энергетическое положение которого совпадает с положением полосы положительной полярности 1.485 eV для $\langle 110 \rangle$ -направления. Следует отметить, что в последнем случае такая особенность наблюдается на коротковолновом крыле интенсивной полосы (отмечено стрелкой на кривой 1). Это свидетельствует о том, что полоса ФГТ в области 1.48–1.50 eV является сложной и обусловлена проявлением в спектре различных фотоионизационных переходов. В частности, полоса 1.495 eV может быть обусловлена переходами с валентной зоны на уровень с энергией $E_c - 0.10 \text{ eV}$, который соответствует сложному центру с участием вакансий кадмия и атомов хлора на месте теллура. Такой анизотропный центр ориентирован вдоль $\langle 111 \rangle$ -направления. При распространении света вдоль $\langle 100 \rangle$ -направления полоса отрицательной полярности расположена при энергии 1.505 eV. Ее возникновение связано с наличием в кристалле другого уровня с энергией $E_c - 0.09 \text{ eV}$, возникновение которого обусловлено наличием комплекса, который включает вакансии кадмия и атомы III группы, расположенные на месте катиона вдоль $\langle 100 \rangle$ -направления. Полоса с энергией 1.54 eV обусловлена переходами с участием уровня $E_c - 0.05 \text{ eV}$. Для $\langle 100 \rangle$ -направления наблюдается также полоса положительной полярности 1.45 eV. Энергетическое положение данной полосы указывает на участие в фотоионизационном переходе акцепторного уровня с энергией $E_v + 0.14 \text{ eV}$, что, согласно [14], соответствует ионизированному междоузельному атому теллура или комплексу $(\text{In}_{\text{Cd}}\text{V}_{\text{Cd}})$. По-видимому, возникновение полосы 1.45 eV для $\langle 100 \rangle$ -направления связано с участием такого анизотропного акцепторного комплекса, в то время как для других направлений это обусловлено участием изолированного акцепторного центра.

Таким образом, при изучении спектров ФГТ исследуемых кристаллов обнаружена фотоионизация глубоких уровней с участием ионов Fe^{2+} , что приводит к их перезарядке в состояние Fe^{3+} . Следует отметить, что для кристаллов CdTe, содержащих примесные атомы железа, методом ЭПР [?] обнаружено также наличие ионов железа в стабильном Fe^{3+} -состоянии. По-видимому, в данном случае компенсация положительного заряда происходит в результате наличия однократно заряженных акцепторных комплексов. Такими комплексами, очевидно, являются обнаруженные в работе анизотропные однократно заряженные акцепторы с участием вакансий кадмия и донорных атомов, концентрация которых в

темноте должна соответствовать концентрации ионов Fe^{3+} . Исходя из полученных результатов, можно предположить следующий возможный механизм возникновения фоторефрактивного эффекта в таких кристаллах. Так, при возбуждении кристаллов $Cd_{1-x}Fe_xTe$ излучением Nd-лазера фоторефрактивный эффект может возникать в результате однофотонного возбуждения примесных центров Fe^{2+} и их фотоионизации. Поглощение кристаллом лазерного света, которое пространственно изменяется при образовании фоторефрактивной решетки, вызывает возникновение периодического распределения свободных электронов. Такие электроны диффундируют из областей высоких концентраций в области низких концентраций, а затем происходят их рекомбинация с Fe^{3+} -центрами и образование нейтральных Fe^{2+} -центров. Поэтому в областях кристалла, соответствующих пикам дифракционной решетки, возникает большая концентрация Fe^{3+} -центров по сравнению с той, которая необходима для компенсации отрицательно заряженных акцепторных центров. В других областях кристалла, отдаленных от месторасположения пиков дифракционной картины, в результате захвата электронов Fe^{3+} -центрами возникает избыток однократно заряженных акцепторов. Избыток ионизированных глубоких донорных Fe^{3+} -центров вблизи пиков дифракционной картины и нескомпенсированных акцепторов в других областях кристалла приводит к возникновению периодического пространственно заряженного поля, которое модулирует показатель преломления, что и приводит к возникновению фоторефрактивного эффекта. Как показано выше, в исследуемых кристаллах обнаружены разные анизотропные акцепторные центры, отличающиеся своей ориентацией в кристалле. Это приводит к тому, что в зависимости от направления возбуждающего света происходит фотоионизация тех или иных центров, в результате чего они не могут принимать участие в компенсации ионизированных глубоких донорных Fe^{3+} -центров. Поэтому, учитывая наличие в кристалле различных концентраций тех или иных анизотропных центров, отличающихся своей ориентацией, следует ожидать зависимость величины фоторефрактивного эффекта от ориентации кристалла по отношению к направлению возбуждающего света (помимо возникновения такой зависимости, связанной с различием электрооптического эффекта для разных направлений в кристалле). Следует отметить, что фотоионизация однократно заряженных акцепторных центров при возбуждении кристалла $Cd_{1-x}Fe_xTe$ излучением неодимового лазера при $T = 300$ К может происходить в результате оптических переходов с поглощением большого количества продольных оптических фононов. Нам представляется, что предложенная модель возникновения фоторефрактивного эффекта и его анизотропии в общем виде имеет место и в случае других примесных $3d$ -элементов, в частности для кристаллов $CdTe$, легированных ванадием, как наиболее перспективных фоторефрактивных кристаллов для ближней ИК-области спектра [1,10,16]. В заключение также необходимо отметить, что проведенные в

работе исследования спектров ФГТ для различных направлений распространения света свидетельствуют от том, что такие измерения являются достаточно эффективным методом обнаружения в кубических фоторефрактивных кристаллах анизотропных центров, определения энергий их фотоионизации и ориентации в кристалле, а также выбора оптимальной ориентации кристаллов для их использования в качестве фоторефрактивных элементов.

Список литературы

- [1] R.B. Bylisma, P.M. Bridenbaugh, D.H. Olson, A.M. Glass. *Appl. Phys. Lett.* **51**, 12, 891 (1987).
- [2] P.N. Bukivskij, R.V. Gamernik, Yu.P. Gnatenko, V.I. Pogorely, I.A. Farina. *Proc. 19th Int. Conf. on the Phys. of Semicond. Warsaw* (1988). V. 11. P. 1106.
- [3] Ю.П. Гнатенко, И.А. Фарина, Р.В. Гамерник, А.С. Крочук, П.И. Бабий. *ФТП* **27**, 10, 1650 (1993).
- [4] А.А. Каплянский. *Опт. и спектр.* **16**, 4, 614 (1964).
- [5] Ю.П. Гнатенко. Автореф. докт. дис. ИФ НАН Украины. Киев (1992).
- [6] S. Seto, A. Tanaka, Y. Masa, S. Dairaku, M. Kawashima. *Appl. Phys. Lett.* **53**, 16, 1526 (1988).
- [7] R. Triboulet. *Rev. Phys. Appl.* **12**, 123 (1977).
- [8] П.И. Бабий, П.Н. Букивский, Ю.П. Гнатенко. *ФТТ* **28**, 11, 3358 (1986).
- [9] П.И. Бабий, Н.П. Гавалешко, Ю.П. Гнатенко, и др. *Препринт. ИФ АН Украины № 23*. Киев (1983). 43 с.
- [10] Ю.П. Гнатенко, Р.В. Гамерник, И.А. Фарина, В.С. Блашків. А.С. Крочук. *ФТП* **30**, 11, 1975 (1996).
- [11] В.В. Слынько, П.И. Бабий, Р.В. Гамерник, Ю.П. Гнатенко. *ФТП* **28**, 3, 506 (1994).
- [12] Р.В. Гамерник, Ю.П. Гнатенко, А.С. Крочук, З.С. Пославський. *УФЖ* **33**, 8, 1171 (1988).
- [13] G.Neu, Y. Marfaing, R. Triboulet, M. Escorne. *Rev. Phys. Appl.* **12**, 266 (1977).
- [14] F.A. Kroger. *Rev. Phys. Appl.* **12**, 210 (1977).
- [15] R.C. Bownan, Jr, E. Donald. Cooper. *Appl. Phys. Lett.* **53**, 16, 1523 (1988).
- [16] A. Partovi, J. Millerd, E.M. Garmire, M. Ziari, W.H. Steier, S.B. Trivedi, M.B. Klein. *Appl. Phys. Lett.* **57**, 9, 846 (1990).