

Влияние СВЧ-облучения на фотолюминесценцию связанных экситонов в монокристаллах CdTe : Cl

© Д.В. Корбутяк, А.П. Лоцько, Н.Д. Вахняк, Л.А. Демчина, Р.В. Конакова[¶],
В.В. Миленин, Р.А. Редько

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева, Национальная академия наук Украины,
03028 Киев, Украина

(Получена 16 февраля 2011 г. Принята к печати 25 февраля 2011 г.)

Методами низкотемпературной фотолюминесценции исследовано влияние микроволнового излучения на трансформацию структурно-примесных комплексов в монокристаллах CdTe:Cl. Показано, что микроволновое облучение приводит к активации центров Cl_{Te}, сопровождающейся увеличением интенсивности линии фотолюминесценции экситонов, связанных на соответствующих донорных центрах Cl_{Te}, обнаружена немонотонная зависимость интегральной интенсивности фотолюминесценции от длительности микроволнового облучения. На начальной стадии микроволнового облучения ($t = 30$ с) наблюдается увеличение интегральной интенсивности экситонной фотолюминесценции, уменьшающейся с увеличением времени микроволнового облучения. Наблюдаемые изменения носят атермический характер. Описан предполагаемый механизм трансформации структурно-примесных комплексов.

1. Введение

Высокоомные монокристаллы CdTe уже длительное время используются для изготовления неохлаждаемых детекторов X- и γ -излучения [1–3]. Высокоомность CdTe достигается в основном путем легирования элементами III (In, Al) или VII (Cl, Br) групп. Среди этих легирующих примесей традиционно наибольшее внимание уделяется хлору, который используется для изготовления высокоомных, компенсированных материалов. Хотя все указанные выше элементы являются мелкими донорами в CdTe, их действие компенсируется собственными дефектами или сложными примесно-дефектными комплексами. Несмотря на широкое практическое применение монокристаллов CdTe:Cl в качестве высокочувствительных детекторов ионизирующего излучения, к настоящему времени не полностью решена проблема стабильности этого материала в процессе эксплуатации и определения физических механизмов трансформации примесно-дефектных состояний под действием внешних факторов (термический и СВЧ-отжиги, радиационная обработка, мощное световое облучение и т.д.).

Известно, что при низкодозовых радиационных обработках полупроводниковых кристаллов и гетероструктур происходит улучшение их кристаллической структуры и уменьшение безызлучательных потерь (наблюдается так называемый эффект малых доз) [4,5]. В частности, для монокристаллов CdTe:Cl этот эффект наблюдался в работе [6]. С целью выяснения механизмов эволюции физических свойств полупроводниковых материалов под воздействием внешних факторов большое внимание уделяется также СВЧ-облучению различной длительности [7–10]. Так, в работе [7] при исследовании влияния СВЧ-обработки на электрофизические свойства

полупроводниковых материалов CdHgTe и поверхностно-барьерных структур на основе GaAs и InP выявлено улучшение их характеристик: уменьшение обратного и избыточного прямого тока, увеличение времени жизни неравновесных носителей заряда за счет стимулированного СВЧ-облучением геттерирования дефектов.

Влияние нетеплового воздействия микроволнового излучения на диффузионные процессы в кремнии, имплантированном бором, и гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми ямами обнаружили авторы [10].

В работах [8,9] с помощью фотолюминесцентных исследований изучалось влияние СВЧ-облучения на спектр дефектных состояний в приповерхностной области полупроводника гетероструктуры SiO₂/GaAs и в пластинах *n*-GaAs. Показано, что модификация дефектной структуры полупроводника под действием СВЧ-облучения зависит от структурно-примесного состояния исходного материала.

Анализ спектров фотолюминесценции (ФЛ), особенно низкотемпературной ФЛ, позволяет получить информацию о трансформации примесно-дефектных состояний и физических механизмах, обуславливающих эти процессы под влиянием внешних воздействий.

Таким образом, к настоящему времени установлено нетепловое воздействие СВЧ-излучения на электрофизические и структурные свойства различных полупроводниковых материалов. В то же время о механизмах воздействия и влияния СВЧ-излучения на тонкую структуру дефектно-примесного состава полупроводников, в том числе такого удобного для этих исследований полупроводника, как CdTe:Cl, поскольку в нем хорошо изучена природа дефектов, известно очень мало.

Именно тот метод был использован нами для изучения влияния СВЧ-излучения на трансформацию структурно-примесных центров донорного и акцепторного типа, на которых связываются экситоны в CdTe:Cl.

[¶] E-mail: konakova@isp.kiev.ua

2. Образцы и методы исследования

Исследуемые монокристаллы CdTe и CdTe:Cl были выращены методом Бриджмена. Легирование хлором осуществляли во время выращивания монокристаллов. Концентрация введенной примеси хлора в выращенных кристаллах составляла $N_{Cl} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $N_{Cl} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Для исследования спектров ФЛ использовали сколотую поверхность кристалла. СВЧ-облучение исследуемых образцов проводили в рабочей камере магнетрона, нагруженного на квазистационарный СВЧ-генератор на частоте 2.45 ГГц. Мощность излучения составляла 7.5 Вт/см^2 . Для предотвращения перегрева образца СВЧ-облучение проводили в специальном режиме по 3–4 с с интервалом между обработками 4 с. Для исследования спектров ФЛ использовались образцы CdTe:Cl, облученные при 3-х экспозициях: 10, 30 и 180 с.

Автоматизированная экспериментальная установка для исследований спектров ФЛ состояла из источника возбуждения (оптический квантовый генератор), криостата, спектрального прибора (МДР-23), фотоприемного устройства, изготовленного на основе фотоэлектронного умножителя ФЭУ-62, усилителя и персонального компьютера. Для возбуждения фотолюминесценции использовался аргоновый лазер непрерывного действия ЛНГ-503 (длины волн $\lambda = 514.5, 496.5, 488.0, 476.5 \text{ нм}$, мощность сфокусированного луча $P \approx 1 \text{ Вт/см}^2$) с возможностью выбора необходимой длины волны. Во избежание перегрева образца при $T > 4.2 \text{ К}$ мощность лазерного излучения не превышала 100 мВт/см^2 .

Низкотемпературные исследования проводились в оптическом гелиевом криостате системы УТРЕКС с электронным блоком регулирования и стабилизации температуры К.41, который позволяет проводить измерения при температурах 4.2–300 К с точностью стабилизации температуры $\sim 0.1 \text{ К}$.

3. Механизмы дефектообразования в полупроводниках под действием СВЧ-облучения

Рассмотрим некоторые механизмы дефектообразования в полупроводниках при воздействии на них СВЧ-излучения. Процессы рождения и преобразования дефектов в полупроводниках могут происходить в локальных атомных конфигурациях, если имеет место сильное взаимодействие относительно слабых электронных возбуждений с атомами конфигурации. При реализации таких неупругих механизмов передачи энергии атомам решетки энергия смещения атомов из узла в междоузлие составляет для большинства полупроводников 1–2 эВ, а энергия, требуемая для перестройки уже существующих дефектов, близка к энергии ионизации валентных электронов [11].

Возможность рождения собственных дефектов в полупроводниках при возбуждении электронной подсистемы наиболее часто связывают с подпороговым электростатическим (примесно-ионизационным) механизмом [11]. Для реализации данного механизма необходимо, чтобы энергия электронов, приобретенная в поле СВЧ-волны, была не ниже энергии ионизации атомов полупроводника, окружающих положительно заряженный донорный примесный атом. В результате в микроскопических областях образуется группа атомов с одинаковым по знаку зарядом, т.е. возникает кулоновская неустойчивость, релаксация которой сопровождается смещением атома из узла решетки в междоузлие. Образующиеся точечные дефекты могут диффундировать по кристаллу, образовывать ассоциативные комплексы или устойчивые кластеры. Очевидно, что такой механизм с высокой вероятностью реализуется, если в полупроводнике присутствуют структурные неоднородности, связанные с неоднородностями легирования, скопления дефектов, микровключения и т.п. В этом случае, как отмечалось в [12], возможно увеличение локальной напряженности электрического поля на 1–2 порядка из-за резкого увеличения поглощения СВЧ-мощности на неоднородностях. Это может вызвать увеличение вероятности ударной ионизации в локальных областях, следовательно, электростатической неустойчивости, приводящей к дефектообразованию с генерацией пар „междоузельный атом–вакансия“.

Рассмотренный механизм дефектообразования, обусловленный электростатической неустойчивостью, может иметь место, если в исходном материале имеются локальные структурные неоднородности. Однако возможна его реализация и в отсутствие локальных структурных нарушений. Так, в [13] при исследовании монокристаллов ZnS и CdS был обнаружен эффект туннельной ионизации локальных центров, связанный с особенностями движения дислокаций в СВЧ-поле. Можно предположить, что обнаруженная ионизация примесных атомов может также приводить к возникновению кулоновской неустойчивости и образованию комплексов „междоузельный атом–вакансия“.

Рассмотрим еще один механизм дефектообразования, который может иметь место при СВЧ-облучении полупроводника. В его основе лежит неустойчивость локальной атомной конфигурации при ее сильном колебательном возбуждении. Отметим, что механизм дефектообразования при колебательной неустойчивости приводит к трансформации уже существующих дефектов в решетке. Модельным аналогом может быть состояние двухатомной молекулы на этапе преддиссоциации или даже диссоциации при возбуждении ее электрона связи в антисвязывающее (разрыхляющее) состояние.

Известно, что в монокристаллах Si, $A^{III}B^V$ и некоторых тройных соединениях существуют локальные центры, которые могут осуществлять СВЧ-колебания [14]. Такие центры, как правило, являются ассоциатами примесного атома с вакансией и характеризуются сильной

электрон-фононной связью. Центры подобного типа могут существовать и в CdTe. Активное взаимодействие таких локальных центров с колебаниями решетки, а также с собственными колебаниями ядер атомов замещения относительно электронных оболочек приводит к сильному электронному возбуждению такого центра. Если имеет место эффективная передача энергии возбуждения в моду реакции [11] до того, как значительная часть этой энергии уходит в другие моды атомного движения, может иметь место перестройка дефекта (например, смещение из узла решетки или диффузионный прыжок).

Распад донорно-акцепторных пар, кластеров точечных дефектов, может происходить и в результате действия специфического механизма, который реализуется, если центры имеют возбужденный уровень E , соответствующий антисвязывающей орбитали [15]. В этом случае энергия связи электрона существенно меньше, чем в связывающем. Уровень E может находиться для акцепторов как в запрещенной зоне, так и в зоне проводимости. Для доноров — в запрещенной зоне и в валентной зоне.

Согласно представлениям, развитым в [16], в присутствии магнитного поля может иметь место заполнение антисвязывающих орбиталей либо вследствие интеркомбинационных переходов, либо в результате поляризации ядер магнитных изотопов (в CdTe содержатся магнитные изотопы элементов O, Cd, Te, Cl). Если этот процесс происходит достаточно эффективно, так, чтобы количество заполненных антисвязывающих орбиталей было равно числу связывающих, то в соответствии с [17] будет происходить распад химических связей и освобождение атомов.

Отметим, что данный механизм перестройки дефектной структуры может изменять как канал излучательной, так и безызлучательной рекомбинации.

4. Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

4.1. Спектры экситонной ФЛ исходных образцов CdTe (нелегированного и легированного хлором)

На рис. 1 представлены типичные спектры ФЛ нелегированного и легированного хлором CdTe. В качественных образцах CdTe наблюдается излучение свободных экситонов с энергией максимума 1.596 эВ, однако эта линия очень слабо выражена вследствие сильного самопоглощения. Кроме того, при достаточно высоких концентрациях доноров линия свободного экситона маскируется полосой излучения экситонов, локализованных на донорах.

Энергия максимума линии ФЛ экситонов, связанных на нейтральных донорах (D^0, X) составляет 1.593 эВ. Донорами в нелегированном CdTe могут быть неконтролируемые примеси III или VII группы, замещающие соответственно атомы Cd или Te или, возможно, собственные дефекты. Кроме линии (D^0, X), также могут

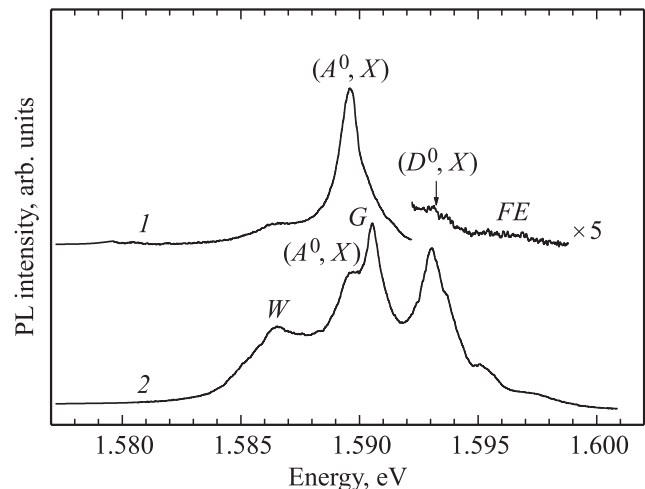


Рис. 1. Спектры экситонной ФЛ, измеренные при $T = 5$ К: 1 — нелегированного, 2 — легированного хлором CdTe.

наблюдаться линии ФЛ, связанные с возбужденными состояниями доноров.

Нелегированный теллурид кадмия, выращенный различными методами, характеризуется p -типом проводимости. Наиболее интенсивной линией в спектре экситонной люминесценции является линия экситонов, связанных на нейтральных акцепторах (A^0, X) с энергией максимума 1.589–1.590 эВ. Природа этой полосы исследовалась во многих работах, однако до сих пор существуют разногласия в идентификации линии (A^0, X) разными авторами [18–20]. В ряде работ линию 1.589 эВ связывают с экситонами, локализованными на акцепторах, созданных остаточной примесью меди (Cu_{Cd}) с энергией ионизации 146 мэВ [21]. При легировании CdTe примесью хлора атомы Cl, замещающие атомы теллура (Cl_{Te}) и являющиеся мелкими донорами с энергией ионизации 14 мэВ, принимают участие в создании комплексов V_{Cd} в виде ($V_{Cd}-Cl_{Te}$) и ($V_{Cd}-2Cl_{Te}$) [22]. Как видно из рис. 1, примесь хлора обуславливает появление новых линий в спектре ФЛ, обозначенных в работе [23] как G ($E_{max} = 1.590-1.591$ эВ) и W ($E_{max} = 1.586-1.587$ эВ). Линия (A^0, X) также может проявляться в спектрах ФЛ образцов с невысокой концентрацией хлора. Интенсивность этих линий, а также линии (D^0, X) (где донором является Cl_{Te}) растет с увеличением концентрации хлора N_{Cl} . При этом также возрастает удельное сопротивление образца, свидетельствующее о самокомпенсации доноров и акцепторов [24]. В работе [25] линии ФЛ G и W были идентифицированы как излучение экситонов, связанных соответственно на комплексах ($V_{Cd}-2Cl_{Te}$) и ($V_{Cd}-Cl_{Te}$).

4.2. Влияние СВЧ-облучения на интенсивность экситонных линий ФЛ

На рис. 2 приведены спектры ФЛ CdTe:Cl ($N_{Cl} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, образец 1) при $T = 5$ К исходного

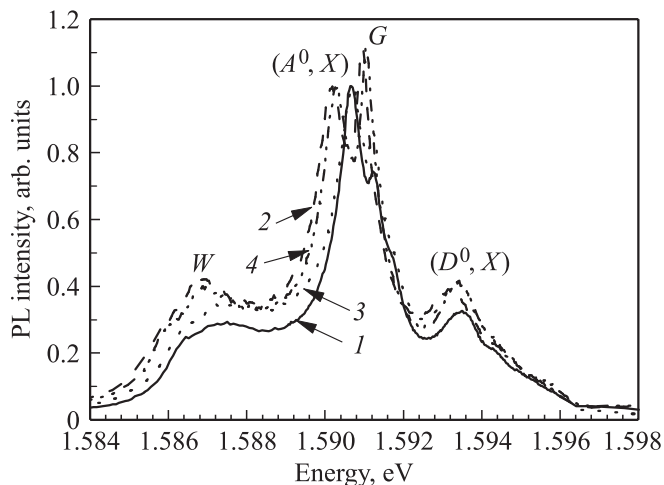


Рис. 2. Спектры ФЛ при $T = 5\text{ K}$ исходного CdTe:Cl с $N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ (1) и после СВЧ-обработки в течение 10 (2), 30 (3) и 180 с (4).

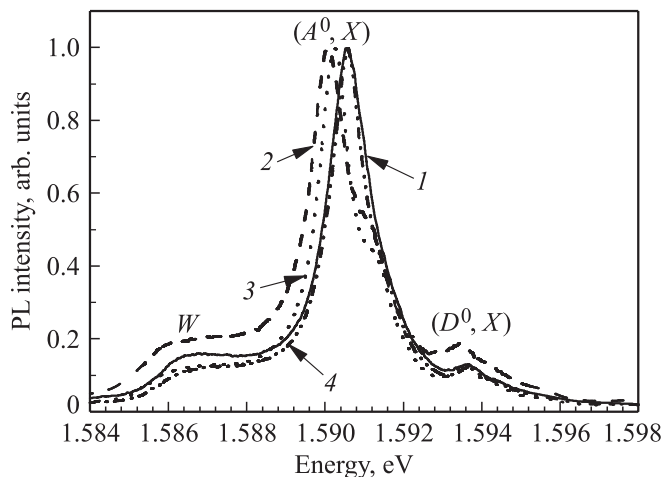


Рис. 3. Спектры ФЛ при $T = 5\text{ K}$ исходного CdTe:Cl с $(N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{17}\text{ cm}^{-3} - 1)$ и после СВЧ-обработки в течение 10 (2), 30 (3) и 180 с (4).

образца (1) и после СВЧ-облучения в течение 10 (2), 30 (3) и 180 с (4). Рис. 3 содержит аналогичные спектры для образца CdTe:Cl ($N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{17}\text{ cm}^{-3}$, образец 2). На рис. 2 и 3 спектры нормированы к интенсивности линии (A^0, X) . Рассмотрим сначала зависимость интенсивности отдельных линий ФЛ от длительности СВЧ-обработки. Обращает на себя внимание рост интенсивности ФЛ линии (D^0, X) — экситонов, связанных на донорных центрах Cl_{Te} (рис. 2). Это означает, что донорные центры активируются в процессе СВЧ-обработки. Следовательно, СВЧ-облучение приводит к тому, что атомы хлора занимают узлы Те. При этом растут также интенсивности линий W (экситон, связанный на центрах $V_{\text{Cd}}-\text{Cl}_{\text{Te}}$). Таким образом, СВЧ-облучение приводит к увеличению концентрации как донорных центров Cl_{Te} , так и акцепторных комплексов $(V_{\text{Cd}}-\text{Cl}_{\text{Te}})$ и $(V_{\text{Cd}}-2\text{Cl}_{\text{Te}})$. Отметим,

что описанный эффект роста концентрации донорных и акцепторных центров в результате СВЧ-облучения для образца 2 (с меньшей концентрацией введенного хлора) проявляется значительно слабее — практически только при минимальных дозах СВЧ-облучения (рис. 3).

Попутно следует отметить, что влияние СВЧ-облучения на интенсивность экситонных линий ФЛ существенно отличается от влияния термического отжига. Если в процессе СВЧ-обработки возрастает интенсивность линий W и G , то при термическом отжиге интенсивность W -линии растет, а G -линии падает практически до нуля. Согласно работе [26], различное поведение линий W и G в процессе термического отжига обусловлено тем, что сначала оба центра ($V_{\text{Cd}}-\text{Cl}_{\text{Te}}$) и ($V_{\text{Cd}}-2\text{Cl}_{\text{Te}}$) диссоциируют на V_{Cd} и Cl_{Te} , а затем избыточный Cl заполняет вакансии кадмия. Поскольку вероятность образования комплексов $(V_{\text{Cd}}-\text{Cl}_{\text{Te}})$, очевидно, больше, чем $(V_{\text{Cd}}-2\text{Cl}_{\text{Te}})$, после отжига комплексы $(V_{\text{Cd}}-\text{Cl}_{\text{Te}})$ образуются вновь, что и приводит к увеличению интенсивности линии W и тушению линии G . Приведенные различия влияния СВЧ и термического отжига на интенсивность экситонных линий ФЛ свидетельствуют об атермическом действии СВЧ-отжига. Именно с наличием атермических факторов связывают изменение структурных характеристик полупроводников в результате СВЧ-облучения.

С целью выяснения возможностей улучшения структурных характеристик CdTe:Cl в результате СВЧ-облучения мы исследовали зависимость интегральной интенсивности экситонных линий ФЛ от дозы СВЧ-облучения. Известно, что изменение интенсивности прикраевых (экситонных) полос ФЛ в результате различного воздействия внешних факторов является достаточно чувствительным индикатором изменения безызлучательных потерь, времени жизни неравновесных носителей заряда и, как следствие, структурного совершенства материала.

На рис. 4 приведены зависимости интегральной интенсивности экситонных полос ФЛ образцов 1 и 2 от дозы СВЧ-облучения. Характерным для обоих образцов CdTe:Cl является падение интенсивности ФЛ

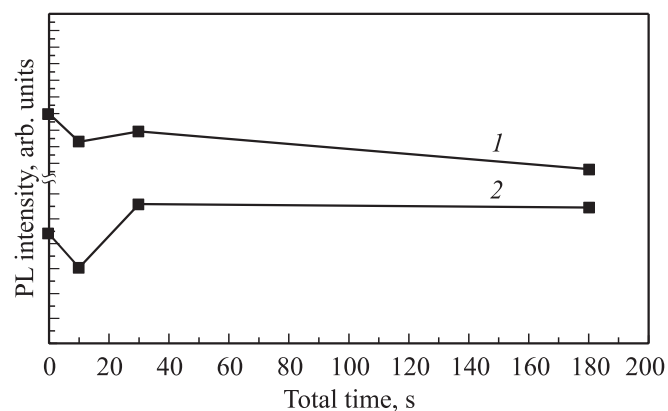


Рис. 4. Зависимость интегральной интенсивности экситонных полос ФЛ монокристаллов CdTe:Cl с $N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ (1) и $N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ (2) от времени СВЧ-облучения.

при минимальных дозах СВЧ-облучения ($t = 10$ с), т.е. при малых дозах СВЧ-облучения эффекта улучшения структурных характеристик CdTe:Cl не наблюдается. Тушение ФЛ может означать, что при малых экспозициях СВЧ-облучения ($t = 10$ с) генерируются новые безызлучательные центры рекомбинации, через которые главным образом протекает рекомбинация неравновесных носителей заряда. Зато при времени экспозиции СВЧ-облучения $t = 30$ с существенно возрастает интегральная интенсивность экситонных линий ФЛ для образца 1 ($N_{Cl} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) в ~ 2.3 раза, для образца 2 ($N_{Cl} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) в ~ 1.3 раза. Дальнейшее увеличение времени экспозиции СВЧ-облучения до $t = 180$ с резко уменьшает интенсивность ФЛ экситонных полос в образце 1 и практически не меняет интегральную интенсивность ФЛ для образца 2. Полученные результаты прежде всего свидетельствуют о том, что величина и характер влияния СВЧ-облучения на трансформацию структурно-примесных центров в полупроводниковых материалах определяются исходным состоянием их дефектности, а также концентрацией и типом имеющихся примесей, что отмечалось в работе [8]. Что касается дозовой зависимости интенсивности ФЛ, то можно констатировать, что эффект улучшения качества материала достигается при определенных оптимальных дозах СВЧ-облучения (в нашем случае при $t = 30$ с). При этом происходит эффективное геттерирование безызлучательных центров (как исходных, так и генерируемых при минимальных дозах СВЧ-облучения) в областях стоков — границ раздела матрицы полупроводника с микровключениями или к поверхности полупроводника. При экспозициях СВЧ-облучения, превышающих оптимальные, происходит генерация новых центров, формирующих новый канал безызлучательной рекомбинации. Этот процесс четко проявляется для образца с $N_{Cl} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (рис. 4).

4.3. Влияние СВЧ-облучения на энергетическое положение экситонных линий ФЛ

Важной особенностью влияния СВЧ-облучения на ФЛ связанных экситонов в CdTe:Cl является обнаруженное нами смещение их энергетического положения (рис. 2 и 3). Хотя смещение сравнительно небольшое (~ 0.5 мэВ), но оно надежно фиксируется и, безусловно, отражает определенные процессы, протекающие в полупроводнике в результате СВЧ-облучения. Как и в случае интенсивности (п. 4.2), дозовые зависимости смещения энергетического положения экситонных линий ФЛ существенно отличаются для образцов 1 и 2. При минимальных дозах СВЧ-облучения ($t = 10$ с) смещение экситонных линий ФЛ в низкоэнергетическую область максимальное для обоих образцов (рис. 5).

Отличия начинаются при увеличении дозы СВЧ-облучения. Для образца 1 при СВЧ-облучении в течение 30 с

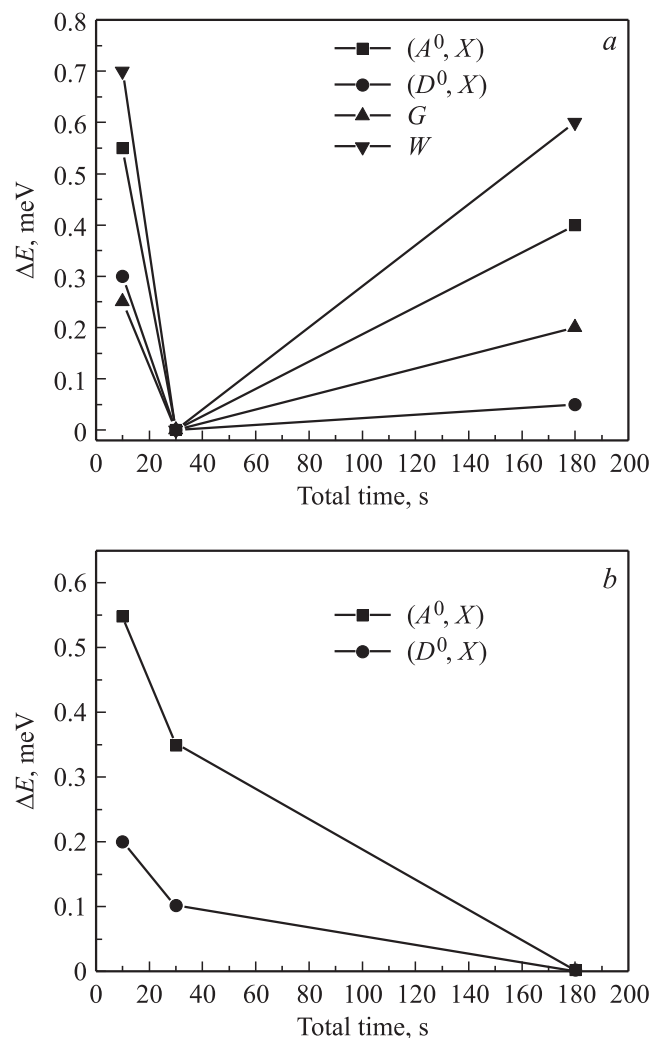


Рис. 5. *a* — энергетическое смещение линий (ΔE) ФЛ при $T = 5$ К монокристаллов CdTe:Cl ($N_{Cl} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) после СВЧ-обработки в течение 10, 30 и 180 с. *b* — энергетическое смещение линий (ΔE) ФЛ при $T = 5$ К монокристаллов CdTe:Cl ($N_{Cl} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) после СВЧ-обработки в течение 10, 30 и 180 с.

энергетические положения максимумов линий возвращаются в исходное состояние. Дальнейшее облучение снова смещает экситонные линии в низкоэнергетическую область. Для образца 2 экситонные линии ФЛ возвращаются к исходному состоянию в результате облучения при $t = 180$ с (рис. 5). Естественно возникает вопрос — с чем связано наблюдаемое смещение экситонных линий ФЛ. Сравнивая величины смещения экситонных линий ФЛ с интенсивностью краевой ФЛ при различных дозах СВЧ-облучения (зависимость спектра краевой ФЛ для образца 2 от дозы СВЧ-облучения приведена на рис. 6), мы обнаружили, что величина смещения тем больше, чем меньше интенсивность краевой ФЛ. Зависимость интенсивности краевой ФЛ от дозы СВЧ-облучения для образцов 1 и 2 приведена на рис. 7. Сопоставляя эти данные с величиной смещения экситонных линий

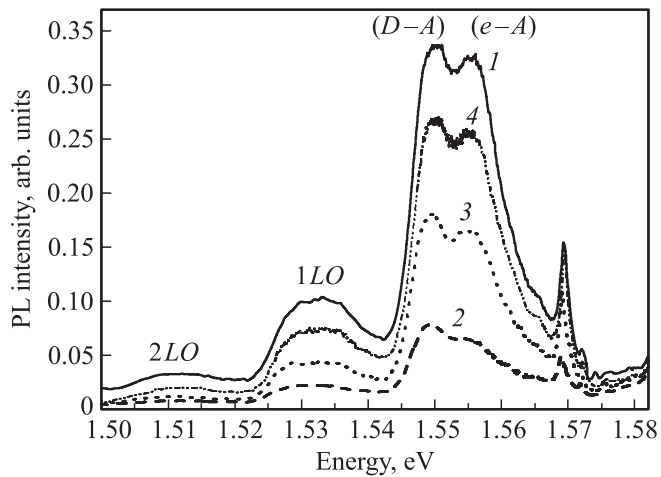


Рис. 6. Спектры „краевой“ ФЛ при $T = 5$ К исходного CdTe:Cl $N_{Cl} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (1) и после СВЧ-обработки в течение 10 (2), 30 (3) и 180 с (4).

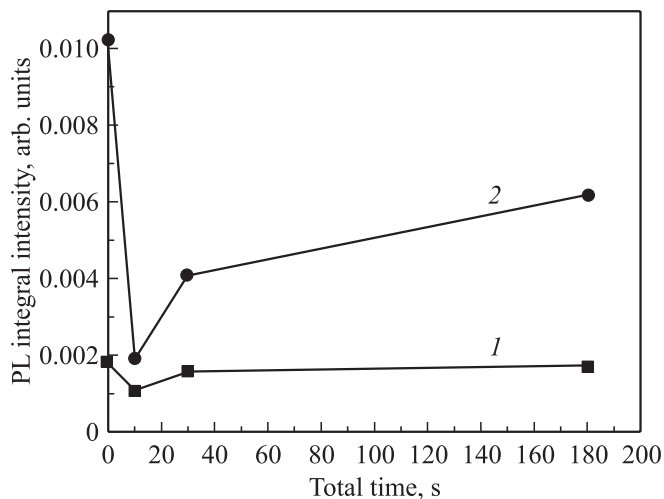


Рис. 7. Зависимость интегральной интенсивности краевой ФЛ от времени СВЧ-облучения для образцов с $N_{Cl} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (1) и $N_{Cl} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (2).

ФЛ (рис. 5), мы видим явную антикорреляцию между величинами смещения и интенсивностями краевой ФЛ. О чем это свидетельствует? Краевая ФЛ, как известно, состоит из двух полос: $(e-A)$ и $(D-A)$, где акцепторами являются изолированные вакансии кадмия. Уменьшение краевой ФЛ свидетельствует об уменьшении концентрации V_{Cd} в процессе СВЧ-облучения. Такое уменьшение может происходить вследствие создания комплексов V_{Cd} с Cl_{Te} . Последние, как отмечалось выше, активизируются в процессе СВЧ-облучения (о чем свидетельствует рост линий (D^0, X) и W). Приведенные соображения свидетельствуют о том, что акцепторные центры V_{Cd} , взаимодействуя с соответствующими акцепторными центрами, на которых связываются экситоны (W , (A^0, X) , G), смещают их в высокоэнергетическую область. Таким образом, в исходном необлученном образце устанавлива-

ется определенное энергетическое положение акцепторов, на которых связываются экситоны, подвергающихся воздействию изолированных акцепторных центров V_{Cd} вследствие кулоновского взаимодействия, которое, как известно, смещает энергетические положения соответствующих центров в высокоэнергетическую область. Уменьшение концентрации V_{Cd} , наблюдаемое вследствие СВЧ-облучения, приводит к уменьшению кулоновского взаимодействия и соответствующему смещению акцепторных уровней в низкоэнергетическую область. Заметим также, что уменьшение величины кулоновского взаимодействия акцепторных центров может происходить вследствие экранирования указанного взаимодействия заряженными центрами, которые могут создаваться при низких дозах СВЧ-облучения.

5. Заключение

В результате СВЧ-облучения монокристаллов CdTe:Cl происходит активация центров Cl_{Te} , наблюдаемая по увеличению интенсивности линии ФЛ (D^0, X) .

Интенсивность низкотемпературной ($T = 5$ К) ФЛ в зависимости от длительности СВЧ-излучения изменяется немонотонно, увеличиваясь при сравнительно малых воздействиях (суммарное время облучения ~ 30 с) и уменьшаясь при возрастании длительности СВЧ-облучения. Отмеченные особенности наблюдаемых эффектов в CdTe:Cl после СВЧ-воздействия носят атермический характер. При этом при малых воздействиях (~ 30 с) происходит структурное упорядочение приповерхностной области образцов CdTe:Cl.

Обнаружено смещение энергетического положения экситонных линий ФЛ в зависимости от длительности СВЧ-облучения, которое можно связать с влиянием кулоновского взаимодействия на процесс взаимодействия акцепторных центров V_{Cd} с акцепторными центрами, на которых связывается экситон.

Список литературы

- [1] Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике, под ред. Ю.К. Акимова (М., Энергоатомиздат, 1989).
- [2] Д.В. Корбутяк, С.В. Мельничук, П.М. Ткачук. УФЖ, **44** (6), 730 (1999).
- [3] A.V. Rybka, L.N. Davydov, I.N. Shlyakhov, V.E. Kutny, I.M. Prokhoretz, D.V. Kutny, A.N. Orobinsky. Nucl. Instrum. Meth. A, **531** (1–2), 147 (2004).
- [4] В.В. Болотов, В.А. Коротченко, А.П. Мамонтов, А.В. Ржанов, Л.С. Смирнов, С.С. Шаймеев. ФТП, **14** (11), 2257 (1980).
- [5] А.П. Мамонтов, И.П. Чернов. Эффект малых доз ионизирующего излучения (М., Энергоатомиздат, 2001).
- [6] Н.Д. Вахняк, С.Г. Крилюк, Ю.В. Крюченко, И.М. Купчак. Журн. физ. исследований, **6** (3), 347 (2002).

- [7] А.А. Беляев, А.Е. Беляев, И.Б. Ермолович, С.М. Комирченко, Р.В. Конакова, В.Г. Ляпин, В.В. Миленин, Е.А. Соловьев, М.В. Шевелев. *ЖТФ*, **68** (12), 49 (1998).
- [8] И.Б. Ермолович, Р.В. Конакова, В.В. Миленин, О.Б. Охрименко, Р.А. Редько. *Физика и химия твердого тела*, **7** (4), 763 (2006).
- [9] И.Б. Ермолович, В.В. Миленин, Г.В. Миленин, Р.В. Конакова, Р.А. Редько. *ЖТФ*, **77** (9), 71 (2007).
- [10] Ю.В. Быков, А.Г. Еремесев, Н.А. Жарова, И.В. Плотников, К.И. Рыбаков, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, В.Д. Скупов. *Изв. вузов. Радиофизика*, **XLVI** (8–9), 836 (2003).
- [11] М.И. Клиндер, У.Б. Лущик, Т.В. Машовец, Г.А. Холодарь, М.К. Шейнкман, М.А. Эланго. *УФН*, **147** (3), 523 (1985).
- [12] Б. Денис, Ю.К. Пожела. *Горячие электроны* (Вильнюс, Моклас, 1971).
- [13] Б.М. Горелов. *Письма в ЖТФ*, **31** (1), 82 (2005).
- [14] В.А. Вдовенков. *Тр. III Межд. конф. „Радиационно-термические эффекты и процессы в органических материалах“* (Томск, ТПУ, 29 июля–3 августа 2002).
- [15] М.К. Шейнкман. *Письма ЖТФ*, **38** (6), 278 (1983).
- [16] А.Л. Бусаченко, Р.В. Сагдеев, К.М. Салихов. *Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях* (Новосибирск, Наука, 1978).
- [17] А.Д. Герасимов, М.К. Гогошвили, З.В. Джабу, Б.М. Коноваленко. *ФТП*, **22** (5), 920 (1988).
- [18] Д.В. Корбутяк, С.В. Мельничук, Е.В. Корбут, М.М. Борисяк. *Теллурид кадмия: примесно-дефектные состояния и детекторные свойства* (Киев, Иван Федоров, 2000).
- [19] F.J. Bryant, H.J. Totterdell. *Rad. Eff.*, **9** (1–3), 115 (1971).
- [20] S. Seto, A. Tanaka, Y. Masa, S. Dairaku, M. Kawashima. *Appl. Phys. Lett.*, **53** (16), 1524 (1988).
- [21] J.P. Chamonal, E. Molva, J.L. Pautrat. *Sol. St. Commun.*, **43** (11), 801 (1982).
- [22] R.O. Bell. *Sol. St. Commun.*, **16** (7), 913 (1975).
- [23] K. Saminadayar, J.M. Frankou, J.L. Pautrat. *J. Cryst. Growth*, **72** (1–2), 236 (1985).
- [24] H.-Y. Shin, C.-Y. Sun. *Mater. Sci. Eng. B*, **41** (3), 345 (1996).
- [25] H.-Y. Shin, C.-Y. Sun. *J. Cryst. Growth*, **186** (3), 354 (1998).
- [26] Н.Д. Вахняк, С.Г. Крилюк, С.Ю. Паранчич, М.Д. Паранський. *Научный вестник Черновицкого университета, Физика, электроника*. **133**, 86 (2002).

Редактор Л.В. Беляков

Effect of microwave irradiation on the photoluminescence of bound excitons in CdTe:Cl single crystals

D.V. Korbutyak, A.P. Lotsko, N.D. Vakhnyak,
L.A. Demchuna, R.V. Konakova, V.V. Milenin,
R.A. Red'ko

Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kyiv, Ukraine

Abstract To study an influence of the microwave radiation treatment on the transformation of structural impurity-involved complexes in CdTe:Cl single crystals we have used low-temperature photoluminescence technique. It has been shown that microwave radiation leads to an activation of Cl_{Te} centers. This is accompanied by an increase of the intensity of photoluminescence band associated with the bound to corresponding Cl_{Te} donor centers. We have observed non-monotonous dependence of the integral intensity of photoluminescence with microwave treatment duration. An increase of the integral intensity of exciton photoluminescence was observed in first stage of microwave radiation exposure ($t = 30$ s). With a further increase of the duration of microwave radiation treatment the decrease of photoluminescence intensity has been observed. These changes have athermal nature. Probable mechanism of the transformation of structural impurity-involved complexes is proposed.