

УДК 537.311.322 : 548.4 : 621.373.826

ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРИСТАЛЛАХ CdS и ZnSe ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ АЗОТНОГО И ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРОВ

А. Ф. Бохонов, Л. Н. Творонович, Г. П. Яблонский

Под воздействием излучения N_2 - и $HeCl$ -лазеров с интенсивностью $I_0 \approx 5-10$ МВт/см² в монокристаллах CdS и ZnSe распадаются комплексы с участием собственных дефектов решетки и образуются новые, которые оказывают слабое влияние на процессы излучательной рекомбинации при низких уровнях возбуждения люминесценции и превращаются в безызлучательные при достаточно высоких. При $I_0 \geq 50$ МВт/см² возникает плазма, происходит повреждение поверхности и образование на ней периодических структур. Изучено влияние электрического поля на люминесцентные свойства кристаллов CdS. Показано, что нагрев области облучения не превышает 100 К. Обсуждается влияние упругих напряжений и электрических полей на процессы дефектообразования.

Облучение полупроводниковых кристаллов лазерным излучением используется в технологии для имплантации примесей, для отжига дефектов, напыления пленок, рекристаллизации поверхностных слоев. Ряд интересных явлений с точки зрения физики кристаллов происходит при интенсивностях лазерного излучения, значительно меньших порогов разрушения, когда при невысоких температурах облучаемой области изменяется структура собственных дефектов решетки. Роль таких дефектов в электрических явлениях и в процессах излучательной и безызлучательной рекомбинаций в полупроводниках A^2B^6 до конца еще не ясна.

Из всех кристаллов группы A^2B^6 более полно исследован сульфид кадмия [1-6] и в меньшей степени селенид цинка [7-9]. Большинство работ посвящено изучению дефектообразования под воздействием излучения рубинового лазера, энергия квантов которого соответствует области прозрачности кристаллов. Кроме того, использовалось излучение KrF -лазера [5], азотного [3, 6] и непрерывного CO_2 -лазеров [8, 9].

В настоящей статье приводятся результаты исследования влияния воздействия излучения эксимерного и азотного лазеров в широком диапазоне плотностей мощности на оптические и люминесцентные свойства полупроводников CdS и ZnSe. С помощью спектроскопии свободных и связанных экситонов интерпретируются изменения в дефектном составе кристаллов, сделаны предположения о механизмах отжига и природе центров безызлучательной рекомбинации.

1. Методика эксперимента

Для исследований использовались высокоомные монокристаллы ZnSe ($\rho \geq 10^{10}$ Ом·см), а также монокристаллы CdS с удельным сопротивлением от 0.1 до 10^{10} Ом·см. Кристаллы селенида цинка перед облучением скалывались ($\{110\}$), а из объемных образцов сульфида кадмия вырезались пластины в базисной плоскости. Поверхность пластин проходила многоступенчатую обработку абразивными порошками, а затем химико-механическую и химическую полировки.

Кристаллы облучались в основном при комнатной температуре излучением азотного ($\lambda_0=337.1$ нм, $P_0=1.5$ кВт) и эксимерного ХеСл-лазеров ($\lambda_0=308$ нм, $P_0=2$ МВт). Длительность импульсов составляла 10 нс, плотность мощности на поверхности I_0 изменялась фокусировкой и нейтральными фильтрами и имела максимальное значение $I_0=250$ МВт/см² для эксимерного лазера. Азотный лазер работал в частотном режиме ($f=10-100$ Гц), а ХеСл-лазер — в режиме одиночных импульсов.

Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась непрерывным излучением HeCd ($\lambda_b=325$ и $\lambda_b=441.6$ нм) и N₂-лазеров. Плотность мощности возбуждающего излучения на поверхности кристалла (I_b) была на 1—2 порядка меньше порогов дефектообразования, которые для импульсного возбуждения составляли $I_0 \geq 1$ МВт/см², а для непрерывного — $I_0 \geq 1$ Вт/см². Измерения спектров и интенсивности ФЛ проводились при температурах 295, 77 и 4.2 К. Спектры регистрировались с помощью спектрального программно-аппаратурного комплекса, созданного на базе монохроматора МДР-23, ДВК-2М и средств сопряжения в стандарте КАМАК, осуществлявших сбор данных и управление ходом эксперимента.

2. Результаты

Сульфид кадмия. После облучения монокристаллов CdS импульсами излучения эксимерного ХеСл-лазера с $I_0=5-10$ МВт/см² интенсивность собственной ФЛ, возбуждаемой этим же излучением или излучением азотного лазера с $I_b < 100$ кВт/см² при комнатной температуре падает в 5—20 раз как в высокоомных, так и в низкоомных кристаллах. При этом не наблюдается каких-либо изменений в рельефе поверхности или потемнение приповерхностного слоя. Интенсивность люминесценции, возбуждаемой излучением непрерывного HeCd-лазера, в низкоомных кристаллах падает в 2—3 раза, а в высокоомных при таком способе возбуждения возрастает в 4—10 раз. Причем с ростом I_b отношение интенсивности ФЛ облученного кристалла к интенсивности необлученного уменьшается до 1.5—2 раза. Кроме полосы межзонной рекомбинации возникает новая полоса или усиливается ее яркость в красной области спектра с $\lambda_{max} \approx 700$ нм. Похожие закономерности в поведении ФЛ после облучения характерны и для воздействия на кристаллы излучения азотного лазера.

При температуре жидкого азота в низкоомных облученных кристаллах выход ФЛ значительно уменьшается как для импульсного, так и для непрерывного режимов возбуждения. Для кристаллов с $\rho > 10^4$ Ом·см яркость люминесценции, возбуждаемой импульсным излучением, после облучения уменьшается в несколько раз. В то же время при непрерывном возбуждении происходит увеличение интенсивности ФЛ свободных экситонов, появление сильной, а часто и преобладающей полосы связанных экситонов, уменьшение интенсивности или полное исчезновение зеленой краевой люминесценции, характерной для высокоомных кристаллов.

Как следует из рис. 1, после облучения образца CdS-011 излучением азотного лазера ($I_0 > 1$ МВт/см², число импульсов $N=100$) интенсивность А-полосы свободных экситонов увеличивается в 6 раз, I₂-полосы связанных экситонов в 12 раз. Интенсивность зеленой полосы падает в 3 раза, размывается полоса В-экситонов. Уменьшение интенсивности, уширение и размытие контура В-полосы свойственно обычно для всех низкоомных кристаллов сульфида кадмия, в спектре люминесценции которых при $T=78$ К преобладает линия связанных экситонов. Удельное сопротивление высокоомных кристаллов после облучения уменьшается на несколько порядков. Так, для одного из образцов темновое сопротивление при комнатной температуре составляло $2 \cdot 10^9$ Ом, а после двух вспышек эксимерного лазера с $I_0=7$ МВт/см² упало до $4 \cdot 10^2$ Ом.

С увеличением плотности мощности эксимерного лазера до 20—50 МВт/см² приповерхностный слой темнеет, интенсивность ФЛ, возбуждаемой как импульсным, так и непрерывным светом резко уменьшается. Стравливание поверхности на 0.1 мкм приводит к частичному восстанов-

лению яркости ФЛ, а после удаления слоя толщиной 1 мкм спектры люминесценции и ее интенсивность соответствуют необлученному кристаллу.

При $I_0 \approx 50$ МВт/см² в центре лазерного пятна у поверхности кристалла на границе с воздухом возникает белая точка плазменного свечения, которая при $I_0 = 75-100$ МВт/см² увеличивается в диаметре до нескольких миллиметров. Порог возникновения плазмы с понижением давления воздуха до 1 Па повышается на 10–20 %. При этом из области плазменного свечения выходит ярко светящийся зелено-синий факел длиной около 20 мм. Угол при вершине факела увеличивается от 10 до 60 градусов с ростом плотности мощности до 200 МВт/см². Анализ спектров испускания

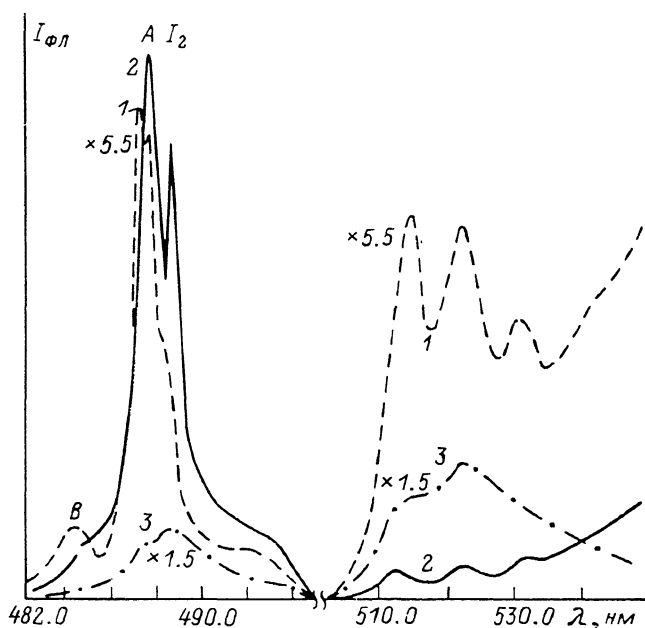


Рис. 1. Спектры ФЛ образца CdS-011 при $T=78$ К и $\lambda_p=441.6$ нм до (1) и после облучения излучением азотного лазера с $I_0 > 1$ МВт/см² (2) и после воздействия электрического поля (3).

эрозивной плазмы показал, что цвет свечения факела обусловлен атомными линиями кадмия, имеющими более низкий потенциал ионизации, чем сера. На поверхности кристалла становятся заметными повреждения в виде локальных деформаций и окисленных участков.

Фокусировка излучения азотного лазера на поверхность кристаллов не приводит к образованию плазмы, но разрушения в виде вмятин, оплавленных участков и кратеров более значительны, чем в случае эксимерного лазера. В проплавленных местах возникают двумерные решетки рельефа похожие на те, которые наблюдались на CdS в [10]. Штрихи решетки ориентированы вдоль одного из эквивалентных направлений $[11\bar{2}0]$ и под углом около 53 градусов к нему.

В результате облучения наблюдаются сильные изменения в экситонных спектрах отражения при температуре жидкого азота: в зависимости от I_0 уменьшаются или совсем исчезают пики отражения. Коэффициент отражения на длине волны эксимерного лазера составляет 22–24 % и не изменяется до $I_0 \approx 20$ МВт/см². При $I_0 \geq 30$ МВт/см² коэффициент отражения уменьшается до 14–15 %, а когда возникает плазма — падает до 2.5–3 %.

Для определения изменений в дефектной структуре кристаллов в результате облучения были измерены спектры люминесценции связанных экситонов при температуре жидкого гелия.

В спектре ФЛ исходных самых высокоомных образцов с $\rho=10^8-10^{10}$ Ом·см преобладает линия I'_1 ($\lambda=488.8$ нм), а в низкоомных кристаллах с $\rho \approx 0.1-1$ Ом·см доминирует линия I_2 ($\lambda=486.9-487.0$ нм). Для кристаллов с промежуточным значением ρ интенсивности этих линий сравнимы. В некоторых исходных образцах присутствует и даже может преобладать I'_2 ($\lambda=486.6$ нм), а иногда проявляется линия I'' ($\lambda=486.1-486.3$ нм).

В результате воздействия лазерного излучения в спектрах связанных экситонов происходят существенные изменения, основные закономерности которых состоят в следующем.

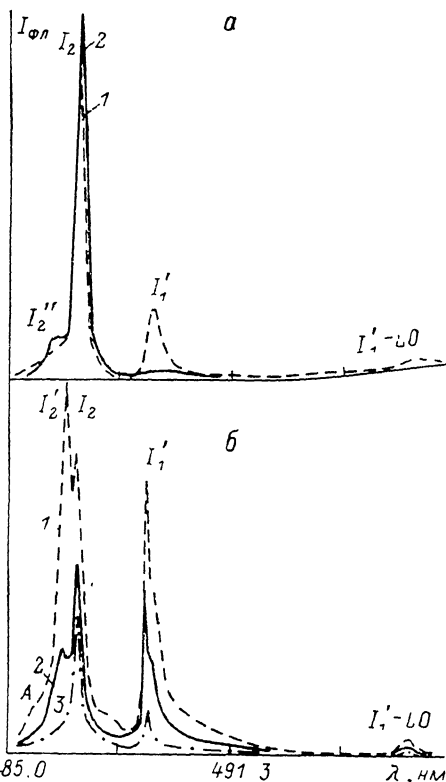


Рис. 2. Спектры ФЛ при $T=4.2$ К образцов CdS-021 (а) и CdS-012 (б) до (1) и после облучения (2, 3) излучением эксимерного лазера с $I_0=5$ (2а), 20 (2б) и 50 МВт/см² (3б).

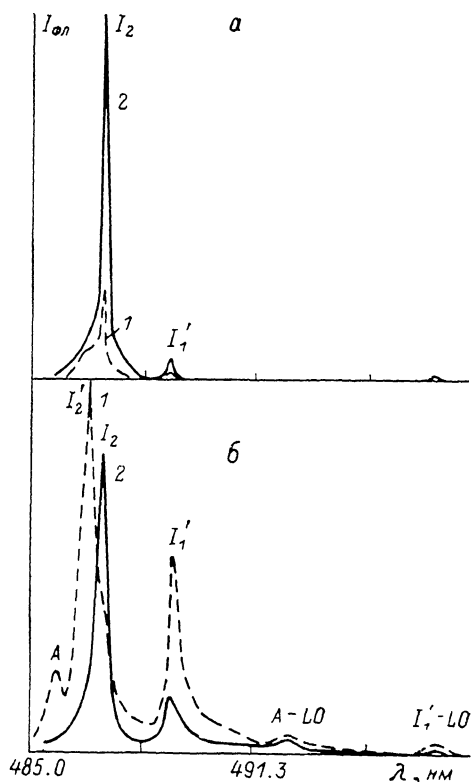


Рис. 3. Спектры ФЛ при $T=4.2$ К CdS-011 до (1) и после облучения (2) излучением азотного лазера с $I_0 > 1$ МВт/см² при $\lambda_b=441.6$ нм (а) и $\lambda_b=325$ нм (б).

Независимо от типа кристалла и I_0 интенсивности линий I'_1 и I'_2 всегда уменьшаются, причем линия I'_2 часто полностью исчезает из спектра, а линия I'_1 остается в спектре. В спектрах облученных высокоомных кристаллов интенсивность I_2 возрастает при облучении с $I_0 < 10$ МВт/см², а при $I_0 > 10$ МВт/см² падает, хотя эта линия остается всегда доминирующей. Для низкоомных кристаллов характерно падение интенсивности всех линий связанных экситонов уже на начальном этапе облучения, но в большей степени I'_1 и I'_2 .

На рис. 2 и 3 приведены спектры экситонной люминесценции кристаллов CdS до (кривые 1) и после облучения (кривые 2, 3) излучением эксимерного (рис. 2) и азотного (рис. 3) лазеров. Люминесценция возбуждалась излучением HeCd-лазера с $\lambda_b=325$ нм (рис. 2, а и 3, б) и $\lambda_b=441.6$ нм (рис. 2, б и 3, а). Из рисунков видно, что после облучения независимо от λ_0 , I_0 и λ_b интенсивность линий I'_1 и I'_2 сильно уменьшается, а интенсивность I_2 возрастает абсолютно или относительно.

Похожие закономерности влияния лазерного излучения на интенсивность и спектры люминесценции кристаллов сульфида кадмия наблюдаются и после облучения образцов, охлажденных до температуры жидкого азота. При этом оказалось, что пороги дефектообразования с точностью до 30 % одинаковы для температур жидкого азота и комнатной.

С целью выяснения общих закономерностей по влиянию на кристаллы переменных и постоянных полей были проведены опыты по изучению воздействия неоднородного электрического поля на люминесценцию кристаллов сульфида кадмия.

Поле подводилось к поверхности кристалла, помещенного в диэлектрическую жидкость, с помощью иглового электрода через разрядный промежуток или при прямом контакте электрода с кристаллом. На электрод подавались импульсы напряжения амплитудой до 50 кВ и длительностью 150 нс.

В месте приложения электрического поля наблюдаются разрушения в виде кратеров, от которых в приповерхностном слое высокоомных кристаллов расходятся каналы пробоя толщиной несколько микрон и длиной до нескольких миллиметров [11]. Зондирование этих областей излучением N_2 и HeCd-лазеров при комнатной температуре показывает, что при импульсном возбуждении яркость ФЛ в кратерах и около каналов меньше, чем в соседних областях, где поле слабое. При непрерывном возбуждении люминесценции в низкоомных кристаллах обнаруживается сильное ослабление собственной люминесценции и усиление красной. Для высокоомных кристаллов характерно усиление собственной люминесценции около каналов пробоя и красной в кратере. Интенсивность экситонной люминесценции при $T=78$ К в кратере уменьшается (рис. 1, кривая 3) и преобладает излучение в области связанного экситона. Интенсивность зеленой ФЛ изменяется слабо, а оранжевая полоса практически не проявляется. При температуре жидкого гелия увеличивается относительная интенсивность линии I_2 . Таким образом, имеются общие закономерности в изменении люминесцентных свойств кристаллов сульфида кадмия при воздействии на них излучением лазеров и электрическим полем.

С е л е н и д ц и н к а. При облучении монокристаллов ZnSe излучением азотного лазера с $I_0 < 1$ МВт/см² и $N=200$ при $T=295$ К квантовый выход ФЛ увеличивается в 5–10 раз [7], а в спектрах люминесценции связанных экситонов при $T=4.2$ К возрастает интенсивность всех линий, но в большей степени I'_1 , которая после облучения преобладает (рис. 4, кривые 2). Иногда возникает линия F с $\lambda_{\max}=449.5$ нм, наблюдавшаяся ранее в [12]. Послойное избирательное травление облученной области свидетельствует о том, что в результате воздействия лазерного излучения увеличивается концентрация дефектов на границе лазерного пятна. Если, например, лазерное пятно имеет форму кольца, то наблюдается накопле-

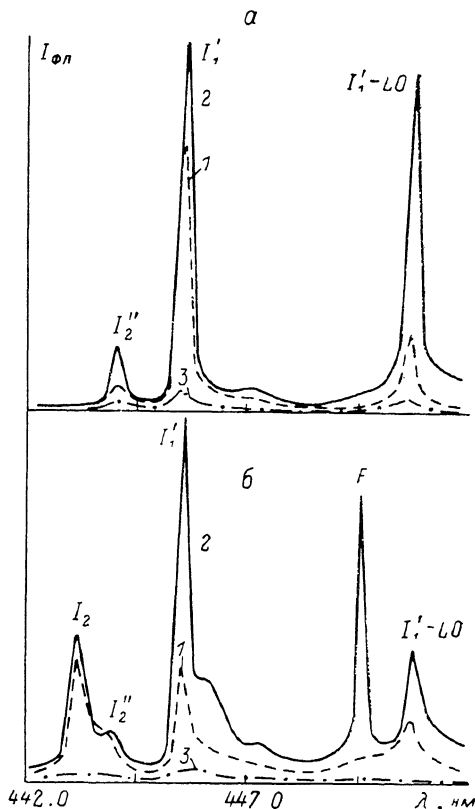


Рис. 4. Спектры ФЛ двух кристаллов ZnSe при $T=4.2$ К и $\lambda=325$ нм до (1), после облучения излучением азотного лазера с $I_0 < 1$ МВт/см² (кривые 2а, 2б), $I_0 > 1$ МВт/см² (кривая 3б) и эксимерного лазера с $I_0=7$ МВт/см² (3а).

ние дефектов и в центральной области кольца, где лазерного света нет.

Увеличение I_0 и числа импульсов способствует сильному дефектообразованию и падению интенсивности всех линий связанных экситонов (рис. 4, кривые 3). В оплавленных местах, так же как и в CdS, образуются периодические структуры с ориентацией штрихов под углами примерно 54 и 30 градусов к направлению [111].

Облучение кристаллов ZnSe несколькими импульсами излучения эксимерного лазера с $I_0 = 5-10$ МВт/см² приводило к ослаблению фотолюминесценции. При $I_0 \geq 50$ МВт/см² на поверхности образца возникала плазма, а при пониженном давлении воздуха и ярко светящийся факел, обусловленный атомными линиями цинка.

3. Обсуждение результатов

Из анализа работ, в которых исследовалась экситонная и примесная люминесценция в кристаллах CdS [2, 3, 13, 14] и ZnSe [12, 15-17], следует, что присутствующие в спектрах ФЛ наших кристаллов линии и полосы можно интерпретировать следующим образом. В монокристаллах CdS линия I'_1 (488.8 нм) обусловлена экситонно-примесным комплексом: нейтральные акцепторы с участием V_{Cd} , I_2 (486.9—487.0 нм) — связанные на нейтральных донорах (V_S) экситоны, I'_2 (486.6 нм) — экситоны на нейтральных донорах (Cd_i) и I''_2 (486.1—486.3 нм) — экситоны на ионизированных донорах. Зеленая, красная и оранжевая полосы обусловлены рекомбинацией через центры, в состав которых входят соответственно S_i , V_S и Cd_i . Линии I_2 (443.1 нм), I'_1 (445.5 нм) и I''_2 (443.9 нм) в кристаллах ZnSe обусловлены экситонами, связанными с нейтральными донорами (V_{Se}), нейтральными акцепторами (V_{Zn}) и ионизированными донорами соответственно.

Уменьшение после облучения с $I_0 < 10$ МВт/см² интенсивностей линий I'_1 , I'_2 в CdS свидетельствует о том, что под воздействием лазерного излучения распадаются комплексы дефектов, в состав которых входят V_{Cd} и Cd_i . При этом из области облучения диффундирует в объем или выходит из кристалла и междуузельная сера, что приводит к гашению зеленой люминесценции. Уменьшение эффективности рекомбинации через эти каналы и генерация дополнительного количества вакансий серы способствуют усилению интенсивности линии I_2 при $T=4.2$ К и $T=78$ К и красной ФЛ при комнатной температуре. Одновременное снижение или исчезновение линий, связанных с V_{Cd} и Cd_i , позволяет предположить, что при низких уровнях облучения возникают нейтральные центры, возможно, пары $V_{Cd}-Cd_i$, которые не проявляют себя при возбуждении люминесценции слабым излучением гелий-кадмиевого лазера. При импульсном возбуждении эти дефекты превращаются в центры безызлучательной рекомбинации благодаря уменьшению эффективного барьера реакции дефекта ΔE [18] за счет обратимых процессов перезарядки при изменении положения квазиуровня Ферми E_F : $\Delta E = E_D - E_F$, где E_D — энергия уровня дефекта.

В низкоомных кристаллах, имеющих более высокий квантовый выход ФЛ и большую концентрацию некомпенсированных доноров, возникающие при облучении дефекты перезаряжаются равновесными носителями. Поэтому в низкоомных кристаллах сразу после облучения образуются безызлучательные центры, и квантовый выход ФЛ уменьшается при любом способе возбуждения. При больших уровнях облучения в кристаллах CdS, так же как и в ZnSe, генерируется высокая концентрация центров безызлучательной рекомбинации, возможно, кластеров, дислокаций. Крупные дефекты проявляются в потемнении приповерхностного слоя, а также в виде дополнительных фигур после избирательного травления облученных кристаллов.

Монокристаллы селенида цинка, особенно выращенные из расплава, имеют значительно меньший, чем кристаллы CdS, квантовый выход люминесценции. В ряде работ [8, 15, 17] показано, что отжиг ZnSe в присутствии

Zn приводит к сильному увеличению выхода люминесценции, и сделан вывод, что вакансии цинка входят в состав безызлучательных центров. Результаты настоящей работы — усиление после облучения линии I'_1 , увеличение интенсивности ФЛ при $T > 77$ К и концентрации дефектов за пределами облучаемой области — позволяют сделать следующие предположения о процессах в ZnSe при лазерном воздействии. Безызлучательные центры в исходных кристаллах представляют собой комплексы с участием вакансий цинка, которые при облучении распадаются и одна из компонент диффундирует из области облучения. Известно [19], что некоторые дефекты в ZnSe, например V_{Se} и Cu_i , имеют сравнительно низкие значения энергий активации диффузии $E_a \approx 0.4$ эВ.

Рассмотрим возможные причины, приводящие к изменению дефектной структуры кристаллов под воздействием облучения.

Оценки максимальной температуры на поверхности CdS в центре зоны облучения, достигаемой в момент окончания лазерного импульса, по формулам работы [20] дают для $I_0 = 5$ МВт/см² $\Delta T = 680^\circ$, а для $I_0 = 10$ МВт/см² $\Delta T = 1360^\circ$. Эти значения явно завышены, по-видимому, из-за того, что в теории не учитывалось лучеиспускание и диффузия неравновесных носителей заряда, играющих в полупроводниках большую роль.

Для более реальной оценки ΔT были поставлены специальные опыты, в которых измерялись спектры ФЛ сульфида кадмия при больших I_0 в различных точках импульса люминесценции, повторяющего форму возбуждающего импульса азотного лазера. Эти спектры сравнивались со спектрами стационарно нагретых кристаллов, температура которых контролировалась (рис. 5). Оказалось, что максимальный сдвиг спектра ФЛ в длинноволновую сторону приходится на спад импульса, что свидетельствует о тепловой природе сдвига. Из сравнения спектров найдено, что максимальный перегрев возбуждаемой области в среднем по пятну составляет 50—70 градусов для плотностей мощности соответствующих генерации высокой концентрации дефектов и разрушениям поверхности.

Число центров, которые изменили свое состояние в процессе лазерного воздействия, например вакансий, протиффундировавших из области облучения, можно определить по формуле [21, 22]

$$N_D = N_g \left[1 - \exp \left\{ -\nu_0 t \exp \left(-\frac{E_a}{kT} \right) \right\} \right],$$

а концентрацию дефектов, возникших при облучении, можно рассчитать с помощью следующего выражения [4]

$$N_D = N_0 \nu_0 t N \exp \left(-\frac{E_a}{kT} \right).$$

В этих формулах N_c ; N_D — концентрация дефектов до и после отжига, N_0 — концентрация собственных атомов, равная $2 \cdot 10^{22}$ см⁻³; $\nu_0 = 1.6 \times 10^{16}$ с⁻¹ — частота скачков единичной вакансии; t — длительность лазерного импульса; N — число импульсов, равное для эксимерного лазера единице; E_a — энергия активации движения вакансий или энергия связи атомов в решетке; $T = T_0 + \Delta T$ — температура кристалла.

Расчеты проводились для процесса диффузии V_{Zn} в ZnSe ($E_a = 1.26$ эВ [22]) и для образования междоузельных атомов в CdS ($E_a = 1.8$ эВ [4]). Оказалось, что при $\Delta T = 100$ К для достижения $N_D \approx N_g$ или $N_D \approx$

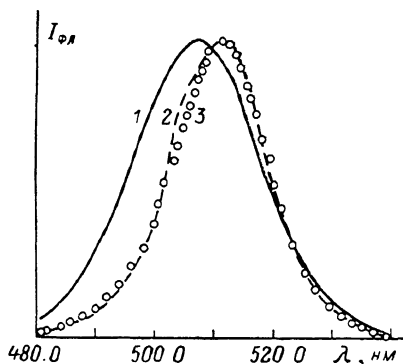


Рис. 5. Спектры ФЛ кристаллов CdS при $T = 291$ К через 5 (1) и 15 нс (2) после начала действия импульса азотного лазера и спектр при температуре 365 К (3).

$\approx 10^{18}$ см⁻³ [4] при $T=291$ К необходимо, чтобы E_a уменьшалась в 2—3 раза, т. е. образование таких дефектов обусловлено преимущественно нетепловыми процессами. Еще менее вероятен тепловой механизм при $T=78$ К из-за малых значений полной температуры.

Сильное влияние на дефектообразование в кристаллах оказывают термоупругие напряжения и электрические поля. Термоупругие напряжения возбуждают акустические и ударные волны [23–25], а электрические поля, возникающие за счет пьезоэффекта, могут в значительной степени понижать барьеры для движения и образования дефектов [18].

Величины термоупругих напряжений σ_T на поверхности кристалла можно оценить по формуле [20]

$$\sigma_T = \Delta T 2 \frac{(1 + \nu) G \alpha_T}{(1 - \nu)},$$

где ν — коэффициент Пуассона, G — модуль сдвига, α_T — коэффициент термического расширения. Для CdS $\nu=0.461$, $G=1.62 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\alpha_T=6.5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ [26, 27]. Принимая $\Delta T=100$ К, получим $\sigma_T=5.7 \times 10^7$ Н/м² ≈ 0.57 кбар. Т. е. значения термоупругих напряжений сравнимы по порядку величины с амплитудой ударных волн [23–25].

Оценка напряженности электрического поля пьезоэффекта дает для этих значений σ_T величину $\mathcal{E} > 10^6$ В/см. Она согласуется с величиной напряженности, необходимой для понижения барьера реакции дефекта [18], и величиной, получаемой из опытов по воздействию неоднородного электрического поля на люминесценцию сульфида кадмия: $\mathcal{E}=10^6$ — 10^7 В/см. Влияние электрического поля может сказываться как непосредственно через понижение барьера реакции, так и благодаря сильным давлениям, возникающим в кристаллах при приложении больших электрических полей.

При температуре жидкого азота вследствие значительного уменьшения α_T , G , ΔT термоупругие напряжения и электрические поля будут на порядок меньше, чем при комнатной температуре, хотя пороги дефектообразования сравнимы.

В заключение отметим, что возникновение в кристаллах при лазерном воздействии больших напряжений и электрических полей, приводящих к интенсивным процессам образования и отжига дефектов, может происходить и за счет электронно-деформационной неустойчивости, когда энергия лазерного импульса переходит в энергию волн акустических деформаций [28, 29].

Авторы выражают благодарность В. С. Буракову и В. П. Грибковскому за поддержку работы, В. И. Козловскому, В. А. Иванову и В. А. Зюлькову за обсуждение результатов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Бродин М. С., Романенко И. Л., Шаблий И. Ю. ФТП, 1975, т. 9, № 7, с. 1418—1419.
- [2] Бродин М. С., Давыдова Н. А., Шаблий И. Ю. Изв. АН СССР, сер. физ., 1982, т. 46, № 6, с. 1037—1043.
- [3] Корсунская Н. Е., Маркевич И. В., Моин М. Д., Тантар М. А., Шаблий И. Ю. ФТП, 1982, т. 24, № 11, с. 3223—3228.
- [4] Корсунская Н. Е., Моин М. Д. Квантовая электроника. Киев: Наукова думка, 1985, № 29, с. 83—93.
- [5] Василицева И. В., Зубков В. М., Саввина Р. М., Скрячка Г. Г., Стародубцев Н. Ф., Таленский О. Н., Полубоярова В. Н., Труфан В. А. Квантовая электроника, 1983, т. 10, № 10, с. 2109—2110.
- [6] Яблонский Г. П. ФТП, 1984, т. 26, № 4, с. 995—1001.
- [7] Яблонский Г. П. ФТП, 1984, т. 18, № 5, с. 918—920.
- [8] Сотников В. Г., Добротворский С. С., Григорьева Л. Н. Поверхность. Физика, химия, механика, 1984, № 5, с. 118—125.
- [9] Водолазский П. В., Кияк Б. Р., Мацко М. Г., Носов В. Б., Петровский Г. Т., Шатилов А. В. ЖПС, 1985, т. 42, № 4, с. 654—657.
- [10] Решетов В. И., Бушцева Г. В., Зименкова Г. М., Насибов А. С., Печенов А. Н., Тяпунина Н. А. Квантовая электроника, 1987, т. 14, № 1, с. 164—169.

- [11] *Гладышук А. А., Гурский А. Л., Паращук В. В., Пашкевич Г. А., Яблонский Г. П.* Препринт № 443 Института физики АН БССР, Минск, 1986.
- [12] *Бродин М. С., Королько Б. М., Кособуцкий П. С., Лысенко С. Ф.* УФЖ, 1976, т. 21, № 7, с. 1086—1089.
- [13] *Thomas D. G., Hopfield J. J.* Phys. Rev., 1962, vol. 128, N 5, p. 2135—2148.
- [14] *Лашкарев В. Е., Любченко А. В., Шейнман М. К.* Неравновесные процессы в фотопроводниках. Киев: Наукова думка, 1981, 264 с.
- [15] *Акимова И. В., Дуденкова А. В., Козловский В. И., Коростелин Ю. В., Насибов А. С., Резников П. В., Тишина Е. М., Шапкин П. В.* Квантовая электроника, 1982, т. 9, № 10, с. 2099—2102.
- [16] *Sato S., Igaki K.* Japan. J. Appl. Phys., 1980, vol. 19, N 10, p. 1953—1958.
- [17] *Иванов Г. Н., Недоегло Д. Д., Новиков Б. В., Талаев В. Т.* ФТТ, 1982, т. 23, № 9, с. 2693—2699.
- [18] *Kimerling L. C.* Sol. St. Electr., 1978, vol. 21, N 11/12, p. 1391—1401.
- [19] *Кукк П. Л., Палмре Ы. В.* Изв. АН СССР. Неорг. матер., 1980, т. 16, № 11, с. 1916—1920.
- [20] *Апполонов В. В., Прохоров А. М., Хомич В. Ю., Четкин С. А.* Квантовая электроника, 1982, т. 9, № 2, с. 343—353.
- [21] *Дзуреченский А. В., Качурин Г. А., Нидаев Е. В., Смирнов Л. С.* Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982. 208 с.
- [22] *Уоткинс Дж.* Дефекты решетки в соединениях A^2B^6 . Точечные дефекты в твердых телах. М.: Мир, 1979. 350 с.
- [23] *Павлович В. Н.* ЖТФ, 1982, т. 52, № 7, с. 1468—1470.
- [24] *Янушкевич В. А., Полянинов А. В., Пруцков Е. Г., Польганов Г. А.* Изв. АН СССР, сер. физ., 1985, т. 49, № 6, с. 1146—1152.
- [25] *Иванов Л. И., Литвинов Н. А., Янушкевич В. А.* Проблемы прочности, 1978, № 6, с. 99—101.
- [26] Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник. М.: Наука, 1979. 339 с.
- [27] *Озотин А. С., Пушкарский А. С., Горбачев В. В.* Теплофизические свойства полупроводников. М.: Атомиздат, 1972. 200 с.
- [28] *Емельянов В. И.* Нелинейно-оптическая деформация акустической подсистемы и сверхбыстрое плавление поверхности полупроводников короткими лазерными импульсами. Препринт МГУ, № 5, 1985 г.
- [29] *Avanesyan S. M., Gusev V. E., Zheludev N. I.* Appl. Phys. A, 1986, vol. 40, N 3, p. 163—166.