

Катодолуминесценция $p-n-p$ -микроструктур в кристаллах CuInSe_2

© С.Г. Конников, Г.А. Медведкин, М.М. Соболев, С.А. Соловьев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 26 апреля 1996 г. Принята к печати 22 мая 1996 г.)

Микроструктуры в монокристаллах $p\text{-CuInSe}_2$, сформированные в сильном электрическом поле, исследованы методом локальной ($d \leq 1$ мкм) катодолуминесценции. Наиболее коротковолновое излучение ($\hbar\omega_m = 1.023$ эВ) наблюдается из слоя n -типа, более длинноволновое ($\hbar\omega_m = 1.006$ эВ) — из областей p -типа. Анализ спектров КЛ позволил сопоставить экспериментально выявленные особенности с оптическими переходами, связанными с донорными и акцепторными уровнями точечных дефектов V_{Cu} , V_{Se} , Cu_i . Тестовые измерения ЕВИС, $C-V$ -характеристик и DLT-спектров подтверждают данные катодолуминесценции и выявляют дополнительные особенности $p-n-p$ -микроструктур.

Введение

Электронные и оптические свойства кристаллов CuInSe_2 главным образом определяются ансамблем точечных дефектов, связанным с индивидуальными атомами, образующими тройное соединение. Химическая природа полупроводникового материала в целом, но также и каждого химического элемента, входящего в его состав, определяет стабильность и устойчивость соединения при внешних воздействиях, например в результате приложения сильного электрического поля. Алмазоподобная решетка CuInSe_2 , как и других тройных соединений алмазоподобного ряда, играет ключевую роль в высокой стабильности этих полупроводниковых веществ [1]. Однако вследствие значительной полярной компоненты в ионно-ковалентных связях этих соединений, они должны проявлять также и некоторую ионную проводимость, например в условиях сильного электрического поля. Если сравнить CuInSe_2 и HgCdTe с другим (не алмазоподобным) халькогенидным материалом Cu_xSe , также успешно используемым в фотовольтаических приложениях, то можно обнаружить значительно меньшую ионную составляющую в электрическом токе для соединений алмазоподобного ряда [2–5].

Недавнее обнаружение и всестороннее изучение слабой ионной проводимости в тройных халькопиритах [6,7] показали важную роль ионов меди (и ионов серебра), а также вакансий V_{Cu} (и V_{Ag}) в электронных и электрохимических свойствах соединений CuInSe_2 , AgInSe_2 и $(\text{Cu}, \text{Ag})\text{InSe}_2$. В частности, была показана тенденция увеличения коэффициента диффузии ионов Cu^+ (вплоть до 10^{-7} см²/с) при уменьшении концентрации металла группы IV в обедненных Cu кристаллах CuInSe_2 .

Стабильность элементов в CuInSe_2

Кратко рассмотрим влияние каждого химического элемента в CuInSe_2 на стабильность соединения в целом с точки зрения сильных внешних воздействий

на его свойства. 1. Известно, что медь диффундирует в кристалле CuInSe_2 главным образом в присутствии сильного электрического поля, т.е. участвует в ионном дрейфе (коэффициент химической диффузии — до 10^{-7} см²/с). 2. Известно также, что индий обеспечивает фактор стабильности для CuInSe_2 в процессах, связанных с сильным воздействием температуры, электрического поля и окислителей. 3. В то же время селен является самым легким компонентом тройного соединения и не гарантирует стабильность материала при сильных физических или химических воздействиях.

Вышеуказанные утверждения поддерживаются следующими доказательствами.

1. Во-первых, ионная проводимость осуществляется, в частности, благодаря ионам Cu^+ [2,6,7]; во-вторых, медь имеет небольшой ковалентный радиус [8], и, в-третьих, самый высокий коэффициент диффузии был установлен в обедненных Cu образцах [2]. *Вывод:* диффузия ионов Cu^+ оказывается большой в CuInSe_2 и протекает преимущественно по вакансионному механизму [2]. Медь, как химический элемент, не обеспечивает стабильность соединения CuInSe_2 .

2. Во-первых, индий сильно окисляется по сравнению с другими элементами в процессах термического окисления [9–11]; во-вторых, индий имеет большой ковалентный радиус, 0.144 нм, и большой атомный вес, 114.82 а.е.м. (ср. Cu–In–Se: 0.135–0.144–0.114 нм/63.55–114.82–78.96 а.е.м.) [8]; в-третьих, в химических реакциях замещения индий вытесняет медь из соединений, например $\text{Cu}_2\text{O} + \text{In} \rightarrow \text{In}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$ [12]; в-четвертых, индий образует более ковалентные связи, чем медь и селен в алмазоподобных полупроводниках, т.е. In находится ближе к оси Периодической таблицы и участвует в создании более ковалентных и менее ионных алмазоподобных соединений, чем Cu и Se [1]. *Вывод:* In — стабилизирующий элемент в CuInSe_2 .

3. Во-первых, более высокое давление паров Se (10^{-3} Па при $T = 100^\circ\text{C}$), чем паров Cu и Se, ко-

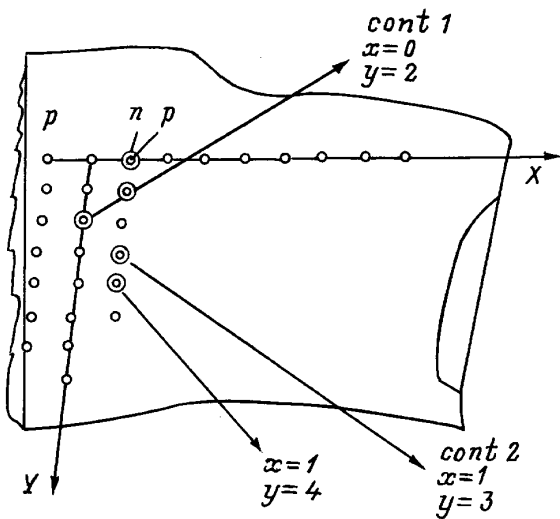


Рис. 1. Образец монокристалла CuInSe_2 с линиями золотых контактов и $p-n-p$ -микроструктурами, сформированными сильным полем. КЛ, EBIC были измерены в координатах x, y : 1.0, 0.2. $C-V$, DLTS в точках 2 и 3 — x, y : 0.2, 1.1.

торые пренебрежимо малы при $T = 100^\circ\text{C}$. При $T = 550^\circ\text{C}$ давление паров $\text{Cu} - < 10^{-9}$, $\text{In} - 10^{-5}$, $\text{Se} - 10^4$ Па [13]; во-вторых, термическая обработка кристаллов и пленок CuInSe_2 в вакууме ведет к обеднению поверхности селеном [14]; в-третьих, химический элемент Se имеет наименьший ковалентный радиус, 0.114 нм, и низкий атомный вес. **Вывод:** химический элемент Se не обеспечивает стабильность соединения CuInSe_2 и процесс диффузии селена должен резко усиливаться с температурой, в том числе и в сильном электрическом поле.

Сильное электрическое поле в кристалле создает резко неравновесные условия как для подвижных носителей заряда (e, h), так для низко подвижных носителей (ионов Cu^+ , Se^{2-} и вакансий V_{Cu} , V_{Se}). Принимая во внимание стабильность элементов и миграцию ионов, изученные для халькопиритов [2], можно представить две стадии в процессе воздействия электрического поля на кристалл CuInSe_2 : 1) электрическая стадия (в основном перенос ионов Cu^+); 2) Джоулева (тепловая) стадия, когда добавляется перенос ионов Se^{2-} .

Чем больше выделение тепла, тем больший перенос ионов Se^{2-} наблюдается. В области с повышенным удельным сопротивлением будет выделяться большая тепловая энергия и атомы селена будут дополнительно покидать узлы решетки. Ионы Se^{2-} будут перемещаться навстречу ионам Cu^+ вдоль силовых линий электрического поля. То же можно сказать о передвижении вакансий V_{Cu} и V_{Se} , если их рассматривать как заряженные точечные дефекты.

Экспериментальная часть

В первом приближении можно рассмотреть две подсистемы точечных дефектов акцепторного и донорного типа, представленные в кристалле одновременно. Сильное внешнее электрическое поле, приближенное к золотым точечным контактам на образце, воздействует на них по-разному. Наиболее подвижные точечные дефекты, т.е. межузельные атомы, вакансии собственных элементов и т.д., участвуют в слабой ионной проводимости, приводящей к формированию концентрационного профиля и слоев обедненных одним или другим типом лигандов. Чтобы оценить преобладание легирующего точечного дефекта в каждом из слоев, мы провели измерения микрокатодолюминесценции и $C-V$ -характеристик на $\text{Au}/p-n-p$ -структурах, созданных на монокристаллических образцах $p\text{-CuInSe}_2$. Образцы были изготовлены в Институте науки Вайсмана в лаборатории проф. Д. Каина (рис. 1).

1. Исследование локальной катодолюминесценции

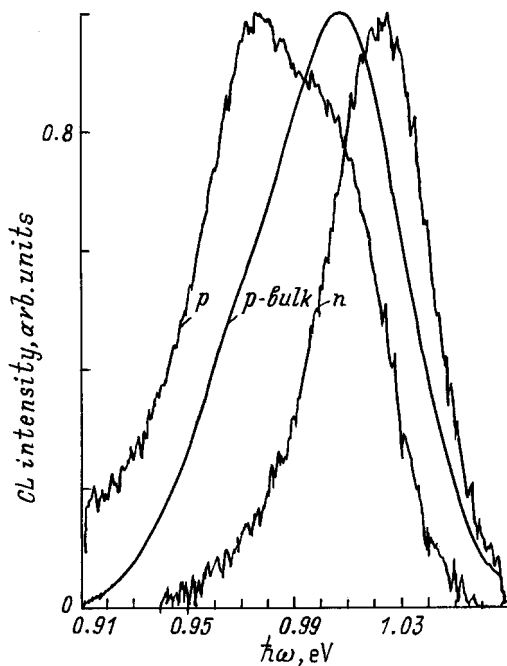
Экспериментальные условия для получения спектров локальной катодолюминесценции (КЛ) были следующие: температура 78–80 К, энергия электронного пучка 10–15 кэВ, ток пучка 50–100 нА, возбуждаемая область 0.6–1.0 мкм. Испускаемое из исследуемой микрообласти КЛ излучение собиралось зеркальной оптикой, затем передавалось по ахроматическому ИК световоду к спектрофотометру МДР-23. Для детектирования сигнала был использован выходной синхронный усилитель (частота модуляции 10 кГц) и охлаждаемый германиевый фотодетектор (ЕО-817, чувствительность $5 \cdot 10^9$ В/Вт). Спектральное разрешение установки было лучше 3 мэВ.

Спектры локальной КЛ были измерены для микрообластей трех различных типов. 1) Электронный пучок возбуждал область вблизи точечного золотого контакта или попадал непосредственно на 20 нм металлический слой и возбуждал люминесценцию из-под контакта. В обоих случаях испускаемое ИК излучение давало идентичное спектральное распределение и исходило из слоя p -типа. 2) Электронный пучок возбуждал слой n -типа, т.е. область около золотого контакта, непосредственно смежную с вышеуказанным слоем p -типа. Поскольку форма границы $n-p$ -перехода в некоторых $p-n-p$ -структурах была не идеально сферической, предпринималась дополнительная подстройка в пределах этой микрообласти так, чтобы электронный луч возбуждал точку с наиболее коротковолновым максимумом КЛ. 3) Электронный пучок возбуждал область p -типа вдали от золотых контактов, т.е. излучение исходило из объемного монокристалла.

Таблица 1. Спектральные особенности спектров КЛ для 3 областей $p-n-p$ -структуры и соответствующие точечные дефекты

Область	Энергия пика, эВ	E_{act} , мэВ	Тип точечных дефектов
p -кристалл	1.006	34	A: V_{Cu} , V_{In} , Cu_{In}
	0.975 (плечо)	65	A: Se_i , Cu_{In} ; D: V_{Se} , Cu_i
n -слой	1.023	17	D: In_{Cu} , V_{Se}
	0.99 (крыло)	41	D: In_{Cu} ; A: V_{Cu} , Cu_{In}
p -слой	1.006 (изгиб)	34	A: V_{Cu} , V_{In} , Cu_{In}
	0.975	65	A: Se_i , Cu_{In} ; D: V_{Se} , Cu_i
	0.92 (крыло)	120	A: Se_i

Измерения, выполненные при позиционировании электронного пучка соответственно в пределах микрообластей 1-го, 2-го или 3-го типа, давали спектры КЛ, эквивалентные или подобные друг другу в пределах экспериментальной точности. Отметим, что некоторые структуры не позволяли надежно зарегистрировать наличие тонкого слоя p -типа, примыкающего к металлу, и в этом случае с помощью средств КЛ и ЕВИС можно было наблюдать только $n-p$ -переход. Кроме того, диодная $n-p$ -структура была обнаружена при исследовании $C-V$ -характеристик при комнатной температуре, в то время как при низких температурах регистрировалась $p-n-p$ -структура типа транзистора. На рис. 2 представлены спектры КЛ для трех вышеуказанных микрообластей $p-n-p$ -структуры. Форма спектральных полос отчетливо различается для этих трех областей, но они все относительно широки: полная

**Рис. 2.** Спектры катодолуминесценции для $p-n-p$ -микроструктур при $T = 80$ K.

ширина на полувысоте (FWHM) в среднем составляет 50–70 мэВ, что характерно для переходов уровень–зона или уровень–уровень. Уширение коротковолнового хвоста к энергиям, превышающим $E_g = 1.04$ эВ в $CuInSe_2$, связано с высоким уровнем электронной накачки в проведенных КЛ измерениях.

Анализ спектров люминесценции показывает их неэлементарность и позволяет разделить их на две отдельные полосы. Основная полоса достигает максимума в коротковолновой области для слоя n -типа, и напротив, главные пики для p -слоя и базового p -кристалла наблюдаются в длинноволновой области. Спектральные особенности этих полос показаны в табл. 1. Интенсивность ИК излучения из прилегающего к металлическому контакту p -слоя была в несколько раз ниже, чем от n -слоя и объемного кристалла p -типа. Это, вероятно, связано с более дефектной микроструктурой слоев, прилегающих к золотому контакту, и повышенной концентрацией дефектов, образованных при воздействии сильного электрического поля. В результате появления безызлучательных центров рекомбинации приводит к спаду квантового выхода люминесценции в p -слое.

Излучательный переход с энергией фотона 1.006 эВ может быть связан с уровнем акцепторного типа, отстоящим на 34 мэВ от валентной зоны $CuInSe_2$. Действительно, наличие мелкого акцепторного уровня в кристалле было определено нашими $C-V$ -измерениями (см. далее). Энергия термической активации обычно отличается от энергии оптической активации на несколько мэВ и в наших измерениях она составляла $E_{term} = 25$ мэВ, а концентрация соответствующих состояний была приблизительно 10^{17} см $^{-3}$. Эти акцепторные состояния могут быть приписаны вакансиям меди, которые имеют энергетическое положение 35–45 мэВ от края валентной зоны [15]. Одновременно также присутствует другой излучательный переход, вероятно, через уровни дефектов V_{In} и Cu_{In} , с близкой энергией активации. Длинноволновый экстремум указывает на наличие более глубокого уровня с энергией оптической активации 65 мэВ, который может быть приписан нескольким типам точечных дефектов: V_{Se} ,

Таблица 2. Параметры двухполосной подгонки спектров катодолюминесценции и излучательные переходы в $p-n-p$ -структуре $CuInSe_2$

Область	Энергия пиков, эВ	FWHM, мэВ	I/I_{max}	Переходы
p -кристалл	1.013	51	0.77	$CB \rightarrow V_{Cu} (A\beta)$ $CB \rightarrow Cu_{In}, V_{In}$
	0.978	61	0.45	$In_{Cu} \rightarrow V_{Cu}$ $In_{Cu} \rightarrow Cu_{In}, V_{In}$ $(V_{Se} \rightarrow VB)^*$
n -слой	1.024	40	0.80	$V_{Se}, In_{Cu} \rightarrow VB$
	1.003	60	0.25	$CB \rightarrow V_{Cu}, Cu_{In}$
p -слой	1.015	28	0.25	$CB \rightarrow V_{Cu} (A\beta)$ $CB \rightarrow Cu_{In}, V_{In}$
	0.979	65	0.97	$In_{Cu} \rightarrow V_{Cu}$ $In_{Cu} \rightarrow Cu_{In}, V_{In}$ $(V_{Se} \rightarrow VB)^*$
p -слой (без подгонки)	0.92	—	0.10	$CB \rightarrow Se_i$ $(V_{Se} \rightarrow VB)$

Примечание.* Переход в скобках незначителен или слаб.

Cu_i, Se_i, Cu_{In} . Однако, основываясь на представленном здесь рассмотрении, касающемся стабильности химических элементов в $CuInSe_2$, мы полагаем, что наиболее вероятными являются донорные дефекты V_{Se} и Cu_i .

Излучательная полоса для слоя n -типа смещена в область коротких волн, она имеет пик при энергии 2.023 эВ и спектральное крыло с особенностью на 0.99 эВ. Эти оптические переходы могут быть связаны с уровнями дефектов перестановки In_{Cu} и Cu_{In} или с акцепторным уровнем V_{Cu} .

Излучательная полоса для слоя p -типа по сравнению с предыдущими уширена в длинноволновую область и проявляет спектральную особенность в виде крыла при энергии 0.92 эВ. Соответствующие оптические переходы могут быть связаны с глубоким уровнем межузельного селена, концентрация которого не так велика, как для точечных дефектов Cu_i, V_{Cu} и V_{Se} , дающих более сильное люминесцентное излучение.

Из сравнения спектров следует, что подобный набор интенсивных излучательных переходов имеется как в исходной подложке p -типа, так и в сформированном электрическим полем слое p -типа. Кроме того, в этом p -слое дополнительно появляется длинноволновое крыло, характерное для дефектов Se_i . Вследствие высокого уровня электронной накачки спектры КЛ уширены в область больших энергий фотонов, например по сравнению со спектрами фотолюминесценции в работе [5], хотя многие спектральные особенности КЛ и ФЛ совпадают. Коротковолновый край в наших спектрах КЛ хорошо аппроксимируется Гауссовым распределением. Поэтому мы использовали Гауссовы подгоночные кривые, чтобы разделить экспериментальные спектры на две элементарные полосы. Параметры подгоночных полос представлены

в табл. 2. Все максимумы аппроксимированных полос находятся в хорошем согласии с главными пиками и спектральными особенностями на экспериментальных кривых (рис. 1). Данные табл. 1 и 2 показывают четкие спектральные отличия для n -слоя и p -областей, с одной стороны, и в то же время подобие для p -слоя и p -подложки, с другой стороны. Этот факт указывает на то, что те же самые точечные дефекты ответственны за излучение в материале p -типа независимо от его природы, но воздействие сильного электрического поля приводит к появлению в p -слое дополнительных точечных дефектов типа Se_i .

Сканирование электронным лучом поперек структуры показало изменение относительной амплитуды двух главных полос КЛ при переходе p -слой $\rightarrow n$ -слой $\rightarrow p$ -подложка. Однако вследствие высокой чувствительности методики к микронарушениям (артефактам) поверхности кристалла, в результате чего менялась мощность накачки и оптический выход люминесценции, исследования непрерывного сканирования не всегда давали корректный результат. Очевидно, лучшие результаты могут быть получены на поперечном сколе структуры и при систематических исследованиях непрерывного сканирования. Различия в спектральном положении полос указывает на различную природу точечных дефектов в областях n - и p -типа. Следуя обзору [15] для энергий ионизации доноров и акцепторов, мы приписываем определенные излучательные переходы нашим КЛ данным (табл. 2). Мы полагаем, однако, что только некоторые типы внесенных в список дефектов могут рассматриваться как реальные претенденты для этих структур, обработанных сильным электрическим полем.

Прежде всего, вакансии меди преобладают в объемном кристалле, а межузельные атомы меди и вакан-

сии селена преобладают в слое n -типа. Это находится в хорошем согласии с более ранним рассмотрением миграции ионов и воздействия электрического поля на электронные свойства кристаллов [2,3,6,7]. Во-вторых, межузельные атомы селена появляются в сформированных p -слоях в дополнение к вакансиям меди и дефектам перестановки In_{Cu} . Это согласуется также с проведенным выше рассмотрением стабильности элементов.

2. EBIC-измерения

Измерения индуцированного электронным лучом тока (EBIC) были сделаны для контроля границы n - p -переходов в изготовленных структурах. Они показывают существование одного или двух переходов с противоположным направлением внутреннего электрического поля. Два перехода наблюдаются отчетливо не всегда и не при каждом сканировании. EBIC-профиль показывает значительно затянутый спад амплитуды тока при сканировании электронным лучом поперек n - p -перехода. Эффективная диффузионная длина, по оценкам > 10 мкм, превышает фактическую L_{diff} в гомогенном материале CuInSe_2 более чем на 1 порядок [16]. Известно, что такое наблюдается при соответствующих профилях легирующих примесей, которые характерны для n - p -перехода диффузионного типа или для слоя объемного заряда благодаря "замороженным" ионам и заряженным вакансиям.

C - V - и DLTS-измерения

Характеристики емкость-напряжение (C - V) и переходная спектроскопия глубоких уровней (DLTS) были использованы для исследования p - n - p -структур CuInSe_2 в диапазоне температур 430–82 К. Напряжения обоих знаков от 0.0 до 7.8 В на частоте 100 кГц были использованы для C - V -измерений. Полученные кривые в координатах $(1/C^2) - V$ показывают зависимость, близкую к линейной, что указывает на резкий n - p -переход. Общая закономерность — зависимость емкости от температуры — является характерной для всех измеренных переходов. Увеличение емкости наблюдается с повышением температуры. Рост емкости в зависимости от обратного смещения, приложенного к образцу, происходит незначительно. Эти факты могут быть связаны с присутствием состояний на интерфейсе, распределенных в глубину запрещенной зоны, или с локализованными состояниями глубоких уровней в области n - p -перехода.

Концентрация этих состояний сравнима с концентрацией свободных носителей заряда в объемном кристалле и она близка к 10^{17} см^{-3} . Энергия термической активации носителей из этих состояний была определена с помощью выражения

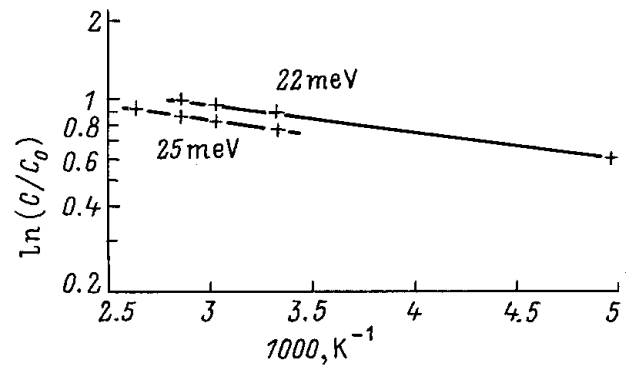


Рис. 3. Температурная зависимость емкости n - p -перехода для двух микроструктур 2 (25 мэВ) и 3 (22 мэВ).

$C = C_0 \exp(-E_a/kT)$ при нулевом смещении $u_0 = 0$. Независимые измерения на двух золотых контактах дают энергию 22 и 25 мэВ (рис. 3). Энергия активации характеризует положение уровня Ферми, если предположить, что на интерфейсе существуют распределенные состояния, в противном случае — энергию локализации, если существуют локализованные состояния. Полученная энергия термической активации характеризует уровни точечных дефектов V_{Cu} , имеющие энергию ионизации 30–35 мэВ согласно данным фотолуминесценции [15].

Поведение кривых C - V для p - n - p -структуры CuInSe_2 изучали при обоих смещениях. Характеристики диодного типа были получены только при комнатной температуре. Уменьшение температуры трансформирует ветви C - V так, что они становятся зеркалоподобными для обратных смещений при температуре жидкого азота. Это позволяет предположить структуру типа транзистора при низких температурах. Такую трансформацию структуры можно объяснить "включением" глубоких метастабильных акцепторных уровней [17] благодаря заглублению уровня Ферми и изменению степени донорно-акцепторной компенсации, которая приводит к изменению типа проводимости в самой высокоомной области микроструктуры. Очевидно, этот акцепторный уровень может быть приписан определенному типу точечных дефектов, например Se_i с энергией $E_{\text{act}} = 120$ мэВ (табл 1).

DLTS-измерения были выполнены для одной из p - n - p -структур на CuInSe_2 . Из спектров DLTS были определены: энергия термической эмиссии с глубокого донорного уровня $E_{\text{em}} = 171$ мэВ и поперечное сечение захвата носителей заряда $\sigma_e = 2.08 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ для этого уровня. Уровень распределен во всем объеме монокристалла CuInSe_2 и его концентрация оценивается как $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Заключение

Исследования катодолуминесценции $p-n-p$ -микроструктур в кристалле CuInSe_2 показывает отчетливое различие в эмиссионном и спектральном составе для исходного объемного p -кристалла и для n - и p -слоев, сформированных сильным электрическим полем. Тип предполагаемых точечных дефектов согласуется с предыдущим изучением миграции ионов и представленным рассмотрением стабильности химических элементов. Тестовые измерения EBIC, $C-V$ и DLTS показывают особенности изготовленных структур и поддерживают результаты измерения КЛ.

Работа была поддержана, в частности, Международным Рич фондом (Rich Foundation, Париж). Авторы выражают благодарность проф. Д. Каину (D. Cahen Израиль, Институт науки Вайсмана) за предоставленные для исследований образцы.

Список литературы

- [1] Н.А. Горюнова. *Сложные алмазоподобные полупроводники* (М., Сов. радио, 1968).
- [2] G. Dagan, T.F. Ciszek, D. Cahen. *J. Phys. Chem. B*, **96**, 11 009 (1992).
- [3] K. Gartsman, L. Chernyak, J.M. Gilet, D. Cahen, R. Triboulet. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 2428 (1992).
- [4] M. Savelli, J. Bougnot, F. Guastavino, J. Marucchi, H.L. Luquet. In: *Solar Energy Conversion Solid-State Physics Aspects*, ed. by B.O. Seraphin (Berlin Heidelberg, N.Y., Springer Verlag, 1979) Ch. 5, p. 189.
- [5] R. Hill, J.D. Meakin. In: *Current in Photovoltaics*, ed. by T.J. Coutts, J.D. Meakin (London, Academic Press, 1985) Ch. 5, 5.5 Cell Stability, p. 286.
- [6] A. Jakubowicz, G. Dagan, C. Schmitz, D. Cahen. *Adv. Mater.*, **4**, 741 (1992).
- [7] D. Cahen, J.-M. Gilet, L. Chernyak, K. Gartsman, A. Jakubowicz. *Science* **258**, Oct. 9, 271 (1992).
- [8] Ч. Киттель. *Введение в физику твердого тела* (М., Наука, 1978) с. 144. [Пер. с четвертого амер. издания: *C. Kittel. Introduction to Solid State Physics* (N.Y., John Wiley and Sons, 1976)].
- [9] М.Е. Воико, Г.А. Медведкин. Proc. 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion (Waikoloa, Hawaii, USA, Dec. 5-9, 1994) IEEE, 1995, v. 1, p. 258.
- [10] Г.А. Медведкин, Р.А. Бекибетов, Т.Л. Макарова, А.Д. Смирнова, В.И. Соколова. *ЖТФ*, **57**, 960 (1987).
- [11] Г.А. Медведкин, Р.А. Бекибетов, А.А. Яковенко. А.С. СССР № 1321141 (приоритет 10 июня, 1985).
- [12] Г.А. Медведкин, Г.А. Амбразявичюс, А.А. Яковенко. *Поверхность. Физика, химия, механика*, N 2, 81 (1987).
- [13] *Handbook of Thin Film Technology*, ed. by L.I. Maissel, R. Glang (N.Y., McGraw Hill Hook, 1970) Pt. I.
- [14] L.L. Kazmerski, M. Hallerdt, P.J. Ireland, R.A. Mickelsen, W.S. Chen. *J. Vac. Sci. Technol.*, **A1**, 395 (1983).
- [15] G. Dagan, F. Abou-Elfotouh, D.J. Dunlavy, R.J. Matson, D. Cahen. *Chem. Mater.*, **2**, 286 (1990).
- [16] L.L. Kazmerski, S. Wagner. *Solar Cells on Ternary Cu-Compounds with Chalcocryrite Structure*. Ch. 2. In: *Current Topic in Photovoltaics*, ed. by T.J. Coutts, J.D. Meakin (London, Academic Press, 1985) p. 62.
- [17] P.M. Mooney, T.N. Theis. *Comm. Cond. Matt. Phys.*, **16**, 167 (1992).

Редактор В.В. Чалдышев

Cathodoluminescence of $p-n-p$ microstructures in CuInSe_2 crystals

S.G. Konnikov, G.A. Medvedkin, M.M. Sobolev, S.A. Solovjev

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Peterdurg, Russia

Abstract Microstructures in CuInSe_2 single crystals tailored by the strong electric field have been studied using the method of local ($d \leq 1 \mu\text{m}$) cathodoluminescence (CL). The most short-wavelength radiation ($\hbar\omega_m = 1.023 \text{ eV}$) has been observed from n -type layer and a more long-wavelength radiation ($\hbar\omega_m = 1.006 \text{ eV}$) — from p -type areas. An analysis of the CL spectra has allowed us to ascribe the experimental features to optical transitions associated with donor and acceptor levels of V_{Cu} , V_{Se} , Cu_i point defects in the crystal. The checking measurements of EBIC, $C-V$ characteristics and DLT spectra confirm the CL data and exhibit additional features of the $p-n-p$ microstructures.

E-mail: gen@pcl.ioffe.rssi.ru
(Dr. Medvedkin)