

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ p -CdSiAs₂(In)

© В.Ю.Рудь[†], Ю.В.Рудь, М.Сергинов

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

[†]Государственный технический университет,

195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 4 июля 1995 г. Принята к печати 10 июля 1995 г.)

Выполнены поляризационные исследования спектральных зависимостей стационарной фотолюминесценции однородно легированных монокристаллов p -CdSiAs₂(In). Обнаружена и обсуждается зависимость поляризационных параметров фотолюминесценции, обусловленной донорно-акцепторной рекомбинацией. Показано, что с ростом уровня накачки в спектрах ФЛ возникает и увеличивается поляризационное расщепление полос, степень линейной поляризации положительна и характеризуется нечувствительным к накачке спектральным контуром. Максимальная степень поляризации $\approx 90\%$ при $T = 80$ К достигается в коротковолновой части полосы ДАР при плотностях накачки $\approx 8 \cdot 10^{20}$ квант/см² · с.

Изучение анизотропии излучательных переходов в кристаллах типа II-IV-V₂ с решеткой халькопирита, являющихся прямыми аналогами одноосно-деформированных полупроводников III-V, представляет интерес для формирования физических основ поляризационной оптоэлектроники. До сих пор поляризационные свойства фотолюминесценции (ФЛ) в полупроводниках II-IV-V₂ исследовались для переходов зона-зона и зона-уровень [1-3], тогда как часто проявляющиеся в таких кристаллах донорно-акцепторные переходы [4-5] оставались на этот счет практически не изученными. Как и в случае бинарных полупроводников, для донорно-акцепторных переходов в кристаллах II-IV-V₂ обнаруживается смещение полос фотолюминесценции в коротковолновую область спектра с ростом уровня накачки, а поляризационные свойства таких полос в литературе вообще не обсуждались [5,6]. В настоящей работе представлены результаты первых поляризационных исследований стационарной фотолюминесценции однородно легированных индием монокристаллов p -CdSiAs₂(In) в зависимости от уровня накачки донорно-акцепторных переходов с участием дефектов решетки различной природы.

Монокристаллы p -CdSiAs₂ выращивались стационарным методом кристаллизации из подщитываемых растворов с добавлением в шихту примеси в виде InAs [4]. Монокристаллы были электрически однородными и имели концентрацию свободных дырок $p \approx 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$. Из монокристаллов изготавливались пластины с ориентациями (100) и (001) со средними размерами $1 \times 5 \times 5 \text{ мм}$, поверхность которых после механической шлифовки обрабатывалась вначале в полирующем травителе $3\text{HNO}_3 : 1\text{HF} : 2\text{H}_2\text{O}$ при $T = 300 \text{ К}$ и затем в деионизованной воде. Фотолюминесценция возбуждалась сильно поглощаемым в CdSiAs₂ излучением аргонового лазера ($\lambda_B = 488 \text{ нм}$, уровень накачки $L = 10^{18} - 10^{21} \text{ квант/см}^2 \cdot \text{с}$) и анализировалась с освещаемой поверхности вдоль нормали к ней. При сканировании поверхности пластин сфокусированным пучком (диаметр примерно 0.1 мм) в условиях фиксированной плотности возбуждающего излучения спектральный контур фотолюминесценции (ФЛ), интенсивность в максимуме полосы и поляризационные индикатрисы (зависимость интенсивности ФЛ от азимутального угла φ между электрическим вектором световой волны ФЛЕ и тетрагональной осью с монокристаллов CdSiAs₂(In)) оказались хорошо воспроизводимыми для каждой из исследованных пластин. Это указывает на высокую локальную однородность получаемых в процессе выращивания монокристаллов CdSiAs₂(In). Спектральное разрешение установки было не хуже 1 мэВ .

Спектральное распределение интенсивности ФЛ для исследованных в данной работе кристаллов CdSiAs₂(In), полученное без анализа поляризации, в диапазоне $300 - 77 \text{ К}$, характеризуется наличием широкой (полная ширина полосы на полувысоте $\delta_{1/2} \approx 70 - 80 \text{ мэВ}$) полосы с максимумом в области $1.45 - 1.55 \text{ эВ}$ ($T = 77 \text{ К}$), энергетическое положение $\hbar\omega_m$ которого смещается в длинноволновую область спектра с понижением L . Интенсивность этой полосы растет пропорционально L . Наблюдаемая зависимость $\hbar\omega_m$ от L , а также от концентрации примеси In в CdSiAs₂ позволяют отнести указанную полосу ФЛ к донорно-акцепторной рекомбинации (ДАР).

Оказалось, что как и для переходов зона-зона и зона-уровень [1,2], поляризационные индикатрисы ФЛ вдоль направления [001] указывают на изотропный характер излучательных переходов, тогда как при отклонениях от этого направления они начинают следовать периодическому закону

$$I_\varphi = I^\parallel \cos^2 \varphi + I^\perp \sin^2 \varphi,$$

причем $I^\parallel > I^\perp$ и положение максимумов I_φ соответствует случаю, когда проекция s на плоскость пластины параллельна \mathbf{E} . Поляризационное отношение I^\parallel/I^\perp при постоянной энергии излучаемых фотонов достигает максимума при наблюдении ФЛ от параллельных тетрагональной оси плоскостей, когда обеспечивается коллинеарность между s и \mathbf{E} . Перечисленные закономерности позволяют считать, что анизотропия ДАР, как и излучательных переходов зона-зона и зона-уровень, задается естественной тетрагональной деформацией кристалла и поэтому находится в соответствии с одноосной симметрией кристаллического поля CdSiAs₂.

Типичные спектральные зависимости ФЛ для экстремальных поляризаций $\mathbf{E} \parallel s$ и $\mathbf{E} \perp s$ при нескольких уровнях накачки L представлены на рис. 1. Из него следует, что с повышением L максимум

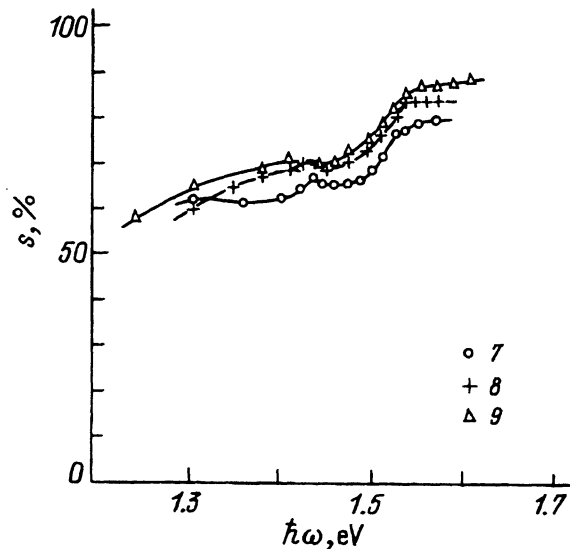
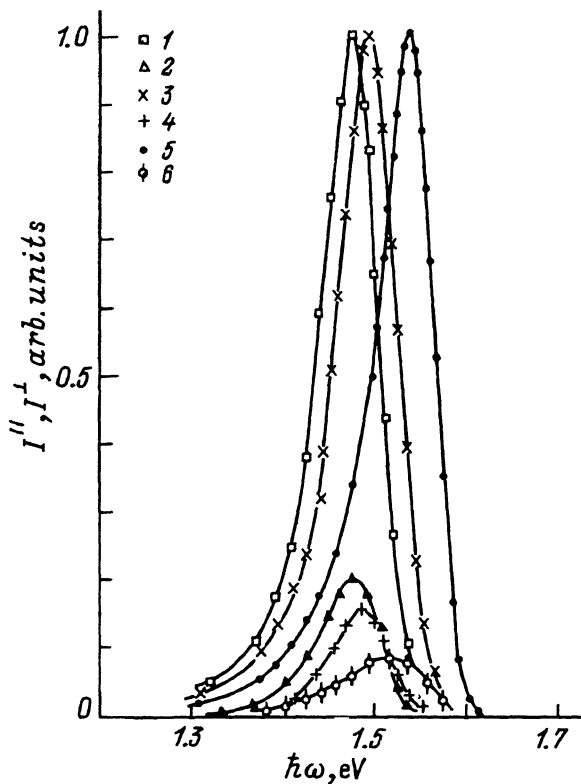


Рис. 1. Спектральные зависимости интенсивности (1-3 — $E \parallel c$, 4-6 — $E \perp c$) и степени линейной поляризации (7-9) ФЛ монокристаллов p -CdSiAs₂(In) при различных уровнях накачки L , квант/см²·с: 1, 4, 7 — $8.8 \cdot 10^{18}$; 2, 5, 8 — $8.8 \cdot 10^{19}$; 3, 6, 9 — $6.5 \cdot 10^{20}$. $\lambda_B = 488$. Спектральное разрешение — 0.5 мэВ. $T = 80$ К.

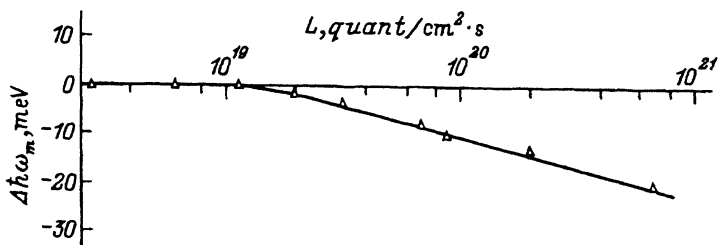


Рис. 2. Зависимость поляризационного расщепления полос ФЛ в монокристаллах $p\text{-CdSiAs}_2(\text{In})$ от уровня накачки. $T = 80 \text{ K}$. $\lambda_B = 488 \text{ nm}$.

полосы для каждой из поляризаций излучаемого кристаллом света смещается в коротковолновую область спектра, причем вклад полосы с поляризацией $E \perp$ с снижается. Поляризационное расщепление полос $\Delta\hbar\omega_m = \hbar\omega_m^{\parallel} - \hbar\omega_m^{\perp}$ в зависимости от уровня накачки представлено на рис. 2. Видно, что в области низких плотностей накачки $L \lesssim 10^{19}$ квант/см² · с поляризационное расщепление максимумов полос отсутствует, тогда как с ростом $L \gtrsim 2 \cdot 10^{19}$ квант/см² · с спектры расщепляются, причем амплитуда $\Delta\hbar\omega_m$ при этом возрастает. Обращает на себя внимание тот факт, что знак возникающего в области $L > 2 \cdot 10^{19}$ квант/см² · с поляризационного расщепления полос ФЛ отрицательный. В области $L \simeq 7 \cdot 10^{20}$ квант/см² · с поляризационное расщепление максимально по амплитуде и достигает -21 мэВ , что может быть обусловлено перераспределением фотогенерированных носителей между расщепленными подуровнями, что и вызывает понижение I^{\perp} относительно I^{\parallel} (рис. 1, кривые 1–6). Уместно отметить, что в случае переходов зона–зона и зона–уровень для CdSiAs_2 $\Delta\hbar\omega_m \simeq 0$, что объясняется сильным кристаллическим расщеплением валентной зоны и связанных с ней уровней [1,2]. Следовательно, в случае донорно-акцепторной рекомбинации изменения уровня накачки ФЛ позволяют управлять распределением дырок между расщепленными уровнями акцепторов, входящими в состав донорно-акцепторных пар.

Спектральные зависимости степени линейной поляризации ДАР $s = \frac{I^{\parallel} - I^{\perp}}{I^{\parallel} + I^{\perp}}$ оказались практически нечувствительными к изменению уровня накачки (рис. 1, кривые 7–9). Знак степени линейной поляризации ДАР $\text{CdSiAs}_2(\text{In})$ во всей спектральной области оказывается положительным и соответствует правилам отбора для межзонных А-переходов [1]. Максимальное значение s достигается при $\hbar\omega > 1.52 \text{ эВ}$ и насыщается на уровне, который определяется накачкой L . В области энергии фотонов ниже 1.5 эВ при всех исследованных значениях L наступает монотонный спад степени линейной поляризации ФЛ, который, начиная с $\hbar\omega_m < 1.48 \text{ эВ}$, прекращается, и s насыщается на уровне, который опять-таки связан с L (рис. 1, кривые 7–9). Согласно [9,10], подобная форма спектральных зависимостей s характерна для неэлементарных полос ФЛ, включающих не менее двух разнополяризованных составляющих. Сходный спектральный контур степени поляризации ДАР в кристаллах $\text{CdSiAs}_2(\text{In})$ при разных уровнях накачки, по-видимому, обусловлен единой природой излучательных переходов между разноудаленными донорами и акцепторами. Увеличение L вы-

зывает рост вклада в ДАР близких пар, в результате чего и происходит рост степени линейной поляризации по мере смещения максимума ФЛ в коротковолновую спектральную область.

Таким образом, ДАР в анизотропных полупроводниках сохраняет известные закономерности этого механизма излучательных переходов в кубических полупроводниках (чувствительность энергетического положения максимума ФЛ к уровню накачки, концентрации центров и т. д. [7]) и обнаруживает новые (поляризационное расщепление полос и величина степени линейной поляризации контролируются уровнем накачки ФЛ, тогда как спектральный контур s практически не зависит от L и, по-видимому, определяется природой центров, образующих донорно-акцепторные пары).

Список литературы

- [1] А. Мамедов, З.А. Паримбеков, Ю.В. Рудь, М. Сергинов. ФТП. **16**, 722 (1982).
- [2] Ю.В. Рудь. ФТП, **17**, 2208 (1983).
- [3] А. Мамедов, З.А. Паримбеков, Ю.В. Рудь. УФЖ, **29**, 282 (1984).
- [4] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, М. Сергинов. Изв. АН СССР. ЖНМ, **26**, 1596 (1990).
- [5] А. Мамедов, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, М. Сергинов. Изв. вузов. Физика, № 10, 78 (1991).
- [6] Ф.П. Кесаманлы, Ю.В. Рудь. ФТП, **27**, 1761 (1993).
- [7] Ж. Панков. *Оптические процессы в полупроводниках* (М., Мир, 1973).

Редактор В.В. Чалдышев
