

Гетеропереход на полупроводниках с цепочечной структурой TlSe–TlInSe₂

© И.В. Алексеев

Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Россия

(Получена 16 июня 1997 г. Принята к печати 11 ноября 1997 г.)

Получен гетеропереход на основе полупроводников с цепочечной кристаллической структурой *p*-TlSe–*p*-TlInSe₂. Для получения использован метод жидкофазной эпитаксии из расплава TlSe на поверхности естественного скола (110) кристалла TlInSe₂. Полученная структура обладает чувствительностью к свету и жесткой радиации. Исследованы некоторые фотоэлектрические свойства гетеропереходов.

Известно, что одним из факторов, стимулировавших разработку гетеропереходов в полупроводниках A^{II}B^{VI} была невозможность создания *p–n*-гетероперехода во многих соединениях этой группы вследствие явления самокомпенсации, затрудняющего их легирование [1,2].

С похожей ситуацией сталкиваемся в анизотропных, например, слоистых полупроводниках, легирование которых осложняется эффектом "самоочистки" — выделением примеси из слоев в межслоевое пространство кристалла [3]. С другой стороны, анизотропность слоистых полупроводников позволяет получать путем их расслаивания совершенные естественные поверхности с низкой плотностью состояний, что важно для достижения высокого качества гетеропереходов (ГП). Работы по созданию ГП в слоистых кристаллах методом ван-дер-ваальсовой эпитаксии интенсивно ведутся в последнее время, в частности, на таких полупроводниках, как InSe, GaSe [4,5]. Представляется интересным исследовать в данном направлении другой класс анизотропных полупроводников — с цепочечной структурой.

Параметры кристаллов

Соединение	<i>a</i> , Å	<i>c</i> , Å	<i>E_g</i> , эВ	<i>T_m</i> , °C	Источник
TlSe	8.02 ± 0.01	7.00 ± 0.02	0.56	334	[6,7]
TlInSe ₂	8.075(3)	6.847(4)			[7]
TlInSe ₂	8.02	6.826	1.2	772	[8]

Примечание. *a*, *c* — постоянные кристаллической решетки, *E_g* — ширина запрещенной зоны, *T_m* — температура плавления.

Интересными представителями таких полупроводников являются TlSe и TlInSe₂. Они изоструктурны, кристаллизуются в тетрагональной решетке. Некоторые параметры кристаллов приведены в таблице. В отличие от соединений A^{III}B^{IV}C^V с цепочечной кристаллической структурой для них существует хорошо отработанная технология выращивания крупных монокристаллов [9]. Кристаллы TlInSe₂ обладают высокой чувствительностью к ближнему инфракрасному излучению, к жесткой радиации, проявляют высокую радиационную стойкость [10]. В настоящей работе приведены первые результаты по изготовлению методом ван-дер-ваальсовой

эпитаксии гетеропереходов TlSe–TlInSe₂. Эпитаксия TlSe на поверхности (110) TlInSe₂ осуществлялась из расплава TlSe при непосредственном контакте расплава с подложкой.

Кристаллы для эксперимента выращивались методом ориентированной кристаллизации, описанным в [9] и представляющим собой модифицированный метод Бриджмена. Выращенные монокристаллические слитки имели кристаллографическую ориентацию с осью *c*, направленной вдоль слитка, проводимость *p*-типа и концентрацию дырок при 290 К $1.7 \cdot 10^{17}$ и $2.1 \cdot 10^{11}$ см⁻³ для TlSe и TlInSe₂ соответственно.

Подложки подготавливались раскалыванием слитка по двум взаимно перпендикулярным плоскостям {110} естественного скола, имели форму стержней прямоугольного сечения с примерными размерами $0.5 \times 2 \times 10$ мм³. Зеркальные плоскости, ограничивающие образцы, не подвергались дополнительной обработке.

Изготовление гетероструктур проводилось в горизонтальной кварцевой трубе в вакууме при остаточном давлении 0.13 Па. Два малоинерционных нагревателя обеспечивали в реакторе вертикальный градиент температуры.

При подготовке к процедуре эпитаксии применяли два варианта взаиморасположения TlSe и подложки: TlSe снизу и сверху подложки. В первом варианте подложку укладывали свежесколотой поверхностью на кристалл или порошок TlSe, загруженные в тонкостенную кварцевую "лодочку". Во втором варианте на подложке располагали образец TlSe с размерами, чуть меньшими размеров подложки. Далее температуру в реакторе поднимали до расплавления TlSe за 7 ÷ 10 мин, фиксировали на 3 ÷ 5 мин, после чего быстро, за 30 с, снижали на 10 ÷ 15°C. Дальнейшее снижение температуры проводили со скоростью 3 ÷ 4°C/мин.

В обоих вариантах эпитаксиальные слои получались монокристаллическими в случаях, когда температура подложки была ниже температуры расплава. Однако в первом варианте при этом эпитаксиальные слои оказывались пронизанными мелкими порами, по-видимому, вследствие перегрева нижних слоев расплава и выделения летучей компоненты. Толщина эпитаксиальных слоев составляла 100 ÷ 200 мкм.

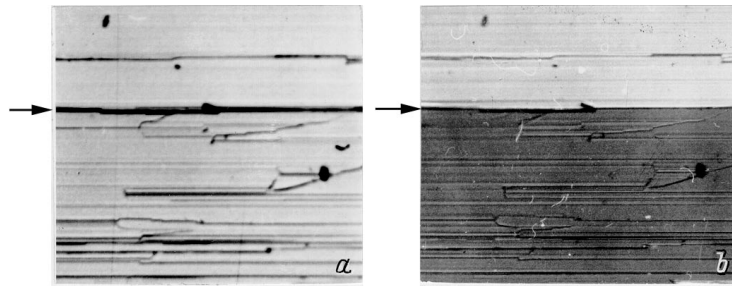


Рис. 1. Микрофотография поверхности бокового скола гетероструктуры в естественном (а) и поляризованном (б) свете. Увеличение $\times 250$.

На приготовление гетероструктуры наносились напылением омические контакты из индия, сплошные со стороны TlSe и в виде узкой продольной полоски с противоположной. На рис. 1 представлена микрофотография поверхности бокового скола гетероструктуры, произведенного в плоскости (110) перпендикулярно границе перехода. В верхней части — эпитаксиальный слой TlSe. Обозначенное стрелками сечение границы перехода ясно различается в поляризованном свете.

Полученные изотипные ГП обладали заметной чувствительностью к свету и жесткой радиации. Вольт-амперные характеристики были почти симметричными с коэффициентом выпрямления $1.5 \div 2$ при напряжении 0.5 В. Токи при этом составляли несколько десятых мкА. Ввиду значительной величины последовательного сопротивления, определяющегося высокоомной подложкой, анализ вольт-амперных и вольт-емкостных характеристик не представлял интереса.

Максимальное значение плотности тока короткого замыкания (освещение со стороны TlInSe₂) составляло $I_{sc} = 0.5 \div 0.6 \text{ mA/cm}^2$. Напряжение холостого хода U_{oc} при концентрированном солнечном освещении достигало $0.39 \div 0.40 \text{ В}$ при комнатной температуре. Полярность фототовета на всех ГП соответствовала положительному потенциалу TlSe относительно TlInSe₂.

Токи, возбуждаемые рентгеновским излучением с энергией $80 \div 100 \text{ кэВ}$, составляли примерно 0.5 мкА при мощности экспозиционной дозы 10 р/мин.

На рис. 2 представлена спектральная характеристика фототовета ГП, снятая в режиме тока короткого замыкания (кривая 1). Из спектра видно, что в фототовете не участвуют носители, генерируемые светом в узкозонной компоненте пары. Это может быть связано, в частности, с тем, что из-за большого различия в концентрации основных носителей в TlSe и TlInSe₂ область пространственного заряда сосредоточена в последнем. Обращает на себя внимание то, что максимум в спектральной характеристике ГП сдвинут относительно максимума в спектре фотопроводимости I_{ph} однородного кристалла TlInSe₂ (кривые 3 и 4) в коротковолновую сторону. Наблюдаемый сдвиг предположительно связываем с эффектом Дембера, так как в использованных высокоомных кристаллах TlInSe₂ с большим значением

$\mu_p \tau_p = 10^{-2} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1}$ (μ_p — подвижность, τ_p — время жизни дырок) должен быть значительным вклад в фотототет диффузионного дырочного тока, направленного от освещаемой поверхности в сторону ГП. Данное предположение подтверждается также и тем, что при освещении вдоль гетероперехода, осуществляемом через боковой скол гетероструктуры, этого сдвига не обнаружено (рис. 2, кривая 2). Кривые 3 и 4 на рис. 2

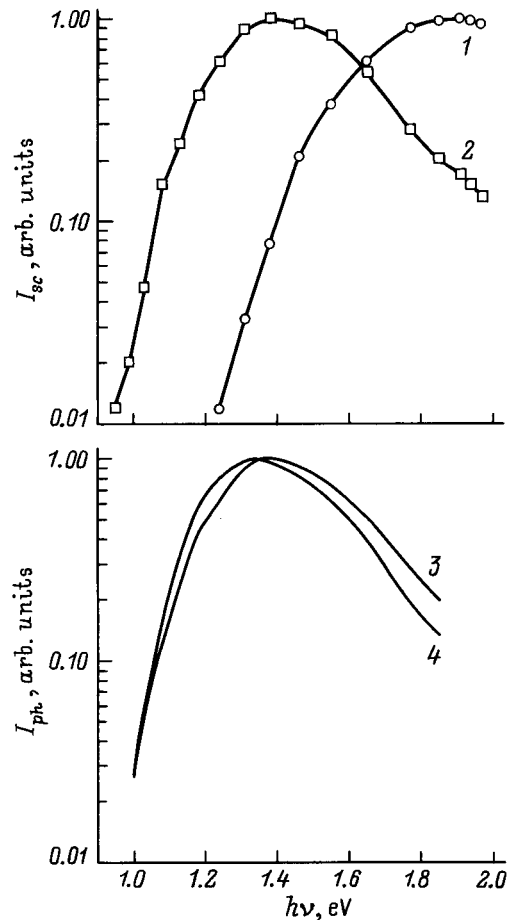


Рис. 2. Спектры I_{sc} гетероперехода при освещении со стороны TlInSe₂ (1), через поверхность бокового скола вдоль границы перехода (2) и спектры фотопроводимости кристалла TlInSe₂ при освещении вдоль (3) и поперек (4) электрического поля.

представляют спектры фотопроводимости однородного кристалла TlInSe_2 при освещении вдоль и поперек электрического поля соответственно. Напряженность поля в образцах составляла при этом 100 В/см, и, следовательно, диффузионная компонента фототока по сравнению с фототоком не могла быть существенной. По этой причине сдвиг в спектрах фотопроводимости незначителен по сравнению с соответствующим сдвигом в спектрах I_{sc} . Подчеркнем, однако, что вывод о роли эффекта Дембера здесь носит предположительный характер.

Оценивались временные параметры полученных гетеропереходов по кинетике напряжения холостого хода, возбуждаемого прямоугольными импульсами излучения инжекционного лазера с длиной волны $\lambda = 0.91$ мкм. Постоянные нарастания и спада фототока составляли 10^{-4} с. Большое значение времени отклика определяется RC ПП. Отметим, что соответствующие времена для детектора на основе однородного кристалла TlInSe_2 , определяемые генерационно-рекомбинационными процессами в TlInSe_2 , на 2 порядка больше.

Специальные исследования показали, что в TlSe и TlInSe_2 избыток и дефицит металлической компоненты не меняет типа проводимости, а избыточный селен образует в них мелкий акцептор. Учитывая при этом относительно низкую температуру эпитаксии и сходный состав материалов пары, можно предположить, что перекрестное легирование и образование паразитных p – n -переходов при формировании ПП маловероятны.

Близость параметров кристаллической решетки и естественная поверхность кристаллов, образующих гетерограницу, позволяют надеяться на возможность реализации в данной системе ПП с низкой плотностью локальных состояний на границе.

Использование низкоомного подложечного материала и отработка технологии изготовления позволят подробнее исследовать ПП и улучшить его характеристики — расширить область спектральной чувствительности, увеличить I_{sc} , уменьшить время отклика и т. д. В этом случае ПП TlSe – TlInSe_2 могут найти применение в качестве детекторов жесткой радиации, радиационно-стойких солнечных элементов.

Список литературы

- [1] Х.Х. Вудбери, В кн.: *Физика и химия соединений A^3B^6* , пер. с англ. под ред. С.А. Медведева (М., Мир, 1970).
- [2] R.W. Dutton, R.S. Muller. *Sol. St. Electron.*, **11**, 749 (1968).
- [3] К.Д. Товстюк. *Полупроводниковое материаловедение* (Киев, Наук. думка, 1984).
- [4] O. Lang, A. Klein. *J. Cryst. Growth*, **146**, 439 (1995).
- [5] O. Lang, C. Peterkoffer et al. In: *Proc. 13th Photovoltaic Conference* (Nizza, 1995).
- [6] *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник* (М., Наука, 1979).
- [7] D. Muller, G. Eulenberger, H. Hahn. *Z. Anorg. Allg. Chem.*, **398**, 207 (1973).
- [8] G.D. Guseinov, E. Mooser, I.V. Alekseev et al. *Phys. St. Sol.*, **34**, 33 (1969).
- [9] И.В. Алексеев. *Изв. АН СССР. Неорг. матер.*, **26**, 1401 (1990).
- [10] И.В. Алексеев. *Изв. АН СССР. Неорг. матер.*, **28**, 2404 (1992).

Редактор Л.В. Шаронова

A heterojunction on TlSe – TlInSe_2 chain structure semiconductors

A.V. Alekseev

Joint Institute for Nuclear Research,
141980 Dubna, Russia

e-mail: aleks@nfjinr.ru