

ПРИРОДА ЦЕНТРОВ ГАШЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ТЕЛЛУРИДЕ СВИНЦА

И.Н. Зеликман, К.В. Киселева, И.П. Ревокатова

Установлено, что дефекты структуры эпитаксиальных слоев PbTe, имеющие рентгенодифракционный контраст в виде "темных зон", представляют собой микровключения избыточного компонента, являющиеся центрами безызлучательной рекомбинации.

Структурные дефекты в монокристаллах PbTe впервые были визуализированы методом рентгеновской трансмиссионной топографии /1/. Было обнаружено три типа дефектов, два из которых идентифицировались как линии скольжения и дислокации, природа же дефектов третьего типа — "темных зон" размером 100 мкм — авторами не была установлена.

С учетом работ /2,3/ нами было сделано предположение, что "темные зоны" могут быть контрастами от деформационных полей, образующихся вокруг микровключений избыточного компонента.

Впервые микровключения в p-PbTe визуализированы методом трансмиссионной электронной микроскопии в работе /3/. Оказалось, что их размеры лежат в интервале от 50 Å до 3 мкм. Такие микровключения (металла в материале n-типа и халькогена в материале p-типа) характерны для узкозонных полупроводников A^4B^6 и образуются в них при охлаждении после кристаллизации вследствие ретроградной растворимости компонентов. Микровключения оказывают влияние на ряд физических свойств соединений, и, в первую очередь, на чрезвычайно важное при изготовлении ИК лазеров свойство — фотолюминесценцию /4/.

Механизм безызлучательной рекомбинации в полупроводниках через дефекты и включения, создающие непрерывный набор электронных состояний (микровключения Pb и Te относятся к дефектам такого типа), описан в /5/. Согласно предложенной в /5/ модели, электроны и дырки, находящиеся на расстоянии, меньшем диффузионной длины L носителей от границы включения, будут стекаться к последней и безызлучательно рекомбинировать через непрерывный набор состояний. Из этого следует, что при одной и той же концентрации избыточного компонента однородное распределение небольших преципитатов, отстоящих друг от друга на расстоянии $R \leq L$, должно влиять на эффективность излучения гораздо сильнее, чем небольшое число крупных включений, для которых $R > L$. Поскольку известно, что характерные величины L для соединений A^4B^6 составляют несколько микрометров, преципитаты, являющиеся эффективными центрами безызлучательной рекомбинации, должны быть субмикронных размеров. Необходимо отметить, что влияние преципитации избыточного компонента на люминесценцию до настоящего времени практически не изучено из-за трудности регистрации самих микровключений.

Т а б л и ц а 1

*Интенсивность люминесценции, относительный объем "темных зон"
на рентгеновских топограммах и концентрация носителей заряда слоев PbTe*

№ образца	Тип проводимости	Концентрация носителей заряда, см^{-3}	Относительный объем "темных зон", %	Интенсивность люминесценции	Средний размер "темных зон", мкм
1	n	$6,8 \cdot 10^{17}$	3,5	сильная	20
2	n	$7,8 \cdot 10^{18}$	2,8	средняя	10
3	n	$5,2 \cdot 10^{18}$	6,7	средняя	40
4	n	$3,1 \cdot 10^{18}$	29,8	нулевая	100
5	p	$1,3 \cdot 10^{17}$	1,8	очень сильная	20
6	p	$1,3 \cdot 10^{17}$	2,8	сильная	30

Для проверки сделанного предположения относительно природы "темных зон" на рентгеновских топограммах PbTe /1/ в настоящей работе предпринята попытка связать число дифракционных контрастов такого типа с интенсивностью люминесценции материала.

Для этого были выращены пленки PbTe на подложках KCl методом фотостимулированной эпитаксии. Концентрация носителей в них измерялась методом Ван-дер-По и изменялась у слоев с электронной проводимостью от $6,8 \cdot 10^{17}$ до $7,8 \cdot 10^{18}$ см⁻³; слой дырочной проводимости имели концентрацию $1,3 \cdot 10^{17}$ см⁻³ (табл. 1).

Результаты рентгенодифракционных исследований показали, что все исследуемые пленки монокристаллически, в них отсутствует разбиение на блоки мозаики, границы которых могли бы быть стоками для вышедшего в процессе охлаждения во вторую фазу избыточного компонента. Это позволяет считать, что выпавший компонент присутствует в матрице пленок в виде микровключений.

В связи с тем, что на гашение люминесценции эпитаксиальных слоев PbTe могут влиять и микровключения атомов калия и хлора, продиффундировавших из подложки /6/, во время выращивания слоя принимались меры, исключающие диффузию этих атомов в пленку. Отсутствие чужеродных атомов K и Cl в пленках было подтверждено с помощью рентгеновского микроанализатора MS-46 по методике /4/.

Рентгенодифракционная визуализация структурных дефектов в пленках PbTe осуществлялась нами с помощью метода Ланга. Поскольку для формирования изображения по этому методу необходимо выполнение условия $\mu t \leq 1$, где μ — линейный коэффициент поглощения в образце, а t — его толщина, допустимая толщина пленок теллурида свинца не превышала 10 мкм. Для снятия топограмм слоев PbTe подложки KCl растворялись в дистиллированной воде. При выбранных геометрических условиях рентгенодифракционной съемки разрешающая способность метода была не хуже 5 мкм.

На топограммах всех исследованных пленок отсутствовали дифракционные контрасты, соответствующие дислокациям и линиям скольжения, и наблюдались лишь деформационные поля в виде темных зон, аналогичные обнаруженным ранее в работе /1/. Средний размер этих областей колебался от 10 до 100 мкм. На рис. 1 в качестве иллюстрации приведены фрагменты полученных топограмм. Поскольку при выращивании слоев были приняты меры, обеспечивающие выделение избыточного компонента преимущественно в виде микровключений, можно считать, что "темные зоны" являются контрастом от деформационных полей, создаваемых этими микровключениями, реальные размеры которых существенно меньше линейных размеров деформационных полей. Относительный объем "темных зон", или, другими словами, относительный объем деформированной решетки в каждой исследованной пленке PbTe определялся путем фотометрирования топограмм на микрофотометре ИФО-451 с точностью не хуже 5% и приведен в табл.1.

Фотолюминесценция пленок исследовалась при возбуждении их неодимовым лазером по методике, описанной в работе /4/; исследования были проведены при 77К. Качественная оценка интенсивности люминесценции приведена в табл. 1.

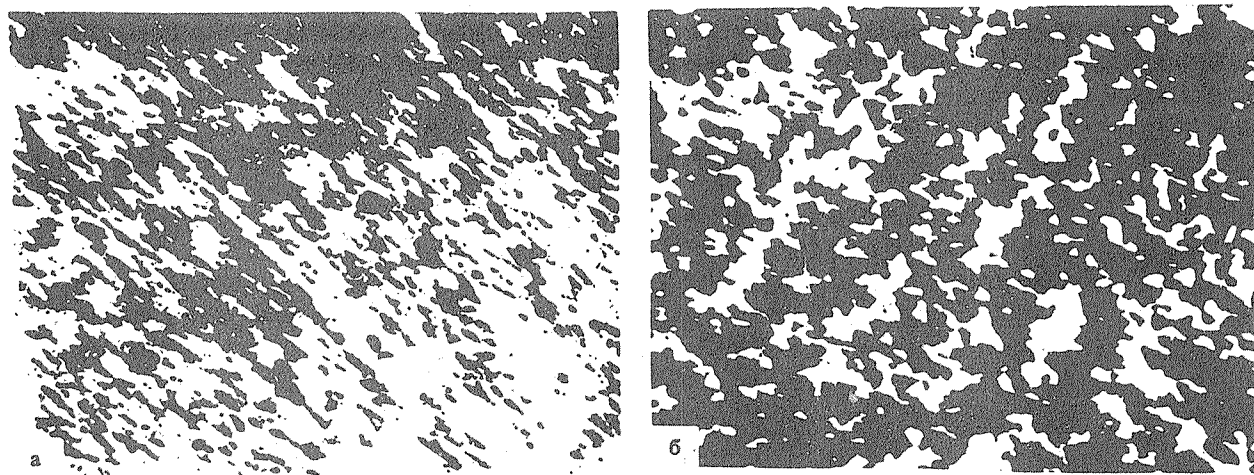


Рис. 1. Фрагменты рентгеновских топограмм образцов № 2 (а) и № 4 (б) (см. табл.). Излучение — MoK_α , отражение (200), увеличение фотографий $90\times$.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что существует корреляция между увеличением относительного объема "темных зон" и понижением интенсивности люминесценции. Поскольку известно /7/, что процесс выделения избыточного компонента подчиняется законам статистики, и распределение микровключений по размерам может быть описано функцией Гаусса, то по концентрации микровключений, визуализируемых на рентгеновских топограммах, можно судить о концентрации мелкодисперсных выделений, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации.

Из таблицы следует также, что влияние микровключений на интенсивность люминесценции является более сильным, чем влияние концентрации носителей. Этим, по-видимому, и объясняются многочисленные неудачные попытки других авторов (см., напр., /4,6/) установить однозначную зависимость интенсивности люминесценции теллурида свинца от концентрации свободных носителей заряда. В заключение отметим, что описанная выше ситуация должна иметь место и во всех других полупроводниковых материалах, форма области гомогенности которых определяет ретроградный характер растворимости компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Berger H., Mizera E., Auleytner J. *Crystal Res. Technol.*, 11, № 1, 43 (1984).
2. Бригов А. Д. и др. *Квантовая электроника*, 3, № 10, 2238 (1976).
3. Mühlberg M., Hesse D. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 76, 513 (1983).
4. Аверюшкин А. С. и др. *Неорганические материалы*, 15, № 3, 380 (1979).
5. Панков Ж. *Оптические процессы в полупроводниках*. М., Мир, 1973, с. 457.
6. Галески Ф. и др. *Электротехника*, сер. 6, вып. 1, 75 (1980).
7. Родо М. и др. В кн. *Рост и легирование полупроводниковых материалов и пленок*, ч. 1, Новосибирск, Наука, 1977, с. 239.

Поступила в редакцию 27 апреля 1987 г.