

Состояния собственных дефектов в монокристаллических пленках PbTe, выращенных модулированной лазерным излучением эпитаксией

© С.В. Пляцко

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,
252650 Киев, Украина

(Получена 5 марта 1997 г. Принята к печати 15 мая 1997 г.)

Исследованы электрофизические свойства слоев PbTe/KCl(KBr), выращенных методом модулированной лазерным ИК излучением эпитаксии, в области различных значений технологических параметров: плотности, мощности W лазерного излучения на мишени и температуры T_s подложки. Установлено, что температурная зависимость постоянной Холла $R_H(T)$ определяется донорными уровнями, один из которых находится в зоне проводимости (E_{d1}), а второй E_{d2} — в запрещенной зоне. Плотность состояний на уровнях и их энергетическое положение зависят от условий роста.

Проблема исследования собственных дефектов в PbTe как в объемных монокристаллах, так и пленках не является новой, но тем не менее не достаточно хорошо изученной. К тому же в пленках решение этой проблемы усложняется присутствием дислокации различной природы и деформационных полей, которые могут приводить к появлению новых энергетических состояний и к смещению уже известных под действием механических напряжений, особенно в случае гетероэпитаксиального выращивания. Совершенно ясно, что многообразие применяемых методов эпитаксиального выращивания, привнесет в эту проблему такое же многообразие особенностей в поведение собственных точечных дефектов и их энергетических состояний.

В представленной работе пленки PbTe/KCl(KBr) выращивались методом модулированной лазерным излучением эпитаксией (МЛИЭ). Мишень распылялась инфракрасным ИК лазерным излучением, которое прерывалось механическим модулятором. Время действия лазерного излучения составляло $\tau_{\text{imp}} = 3 \cdot 10^{-3}$ с с частотой повторения $f = 20$ Гц. Излучение вводилось с помощью оптической системы и системы фокусировки в вакуумную камеру с остаточным давлением паров $P = 1 \cdot 10^{-6}$ Тор. В МЛИЭ заложена возможность контроля толщины выращиваемых слоев, температуры подложек, контроля и управления плотностью мощности лазерного излучения. В качестве источника-мишени использовался монокристаллический PbTe стехиометрического состава с концентрацией свободных дырок $p_{77} = (3 - 5) \cdot 10^{18}$ см⁻³ и подвижностью $\mu_{77} = 1.2 \cdot 10^4$ см²/В·с. Источник в процессе эпитаксии совершал вращательно-поступательное движение, что предотвращало кратерообразование и изменение диаграммы разлета распыляемого материала.

Из проведенного анализа зависимости электрофизических свойств от технологических условий выращивания методом МЛИЭ PbTe/KCl ясно, что они определяются различного рода электроактивными дефектами, которые возникают в пленках в процессе роста. В зависимости от температуры роста и при постоянной плотности мощности лазерного излучения на мишени $W = 8.5 \cdot 10^4$ Вт/см² в области температур подложки $T_s = 270^\circ\text{C}$ наблюдается

инверсия типа проводимости $n \rightarrow p$, а затем обратная инверсия $p \rightarrow n$, когда температура эпитаксии достигает $T_s = 330^\circ\text{C}$. Дальнейшее увеличение температуры T_s приводит к возрастанию концентрации электронов с тенденцией к насыщению при $T_s > 400^\circ\text{C}$. Поскольку легирование пленок в этом случае не проводилось, электроактивные дефекты различной природы, возникающие в слоях, являются собственными и зависят, как показывают экспериментальные исследования, от температуры роста T_s и плотности мощности лазерного излучения W .

На рис. 1 представлены температурные зависимости постоянной Холла для пленок PbTe/KCl(KBr), выращенных в различных технологических условиях. Видно, что эти зависимости существенно различаются между собой, а также отличаются от аналогичных зависимостей, для образцов выращенных традиционными методами.

В области низких температур эпитаксии $80 \leq T_s \leq 270^\circ\text{C}$ при постоянной плотности мощности ($W = 8.5 \cdot 10^4$ Вт/см²) лазерного излучения на мишени в зависимости $R_H(T)$ присутствует активационный участок, связанный с ионизацией локальных состояний в зоне проводимости (рис. 1, кривая 1). Повышение температуры эпитаксии изменяет характер зависимости $R_H(T)$ (кривые 2, 3, 5). В промежуточной области температур ($270 \leq T_s \leq 330^\circ\text{C}$), когда наблюдается p -тип проводимости, с изменением концентрации дырок наблюдается обычное для p -PbTe смещение температуры инверсии типа проводимости от $T_{\text{inv}} = 120$ до 330 К а в остальном зависимость $R_H(T)$ является обычной (рис. 1, кривая 4).

В области низких температур подложки T_s концентрация донорных центров, уровень которых находится в зоне проводимости, возрастает с увеличением плотности мощности на мишени и при $W = 10^5$ Вт/см² достигает $N_{d1} = 1 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

Наряду с изменением концентрации N_{d1} повышение температуры эпитаксии вызывает появление и рост концентрации донорных центров N_{d2} , уровень которых при 0 К находится в запрещенной зоне. Следует отметить, что донорные центры N_{d2} присутствуют и при низких температурах выращивания (рис. 1, кривая 5), однако их

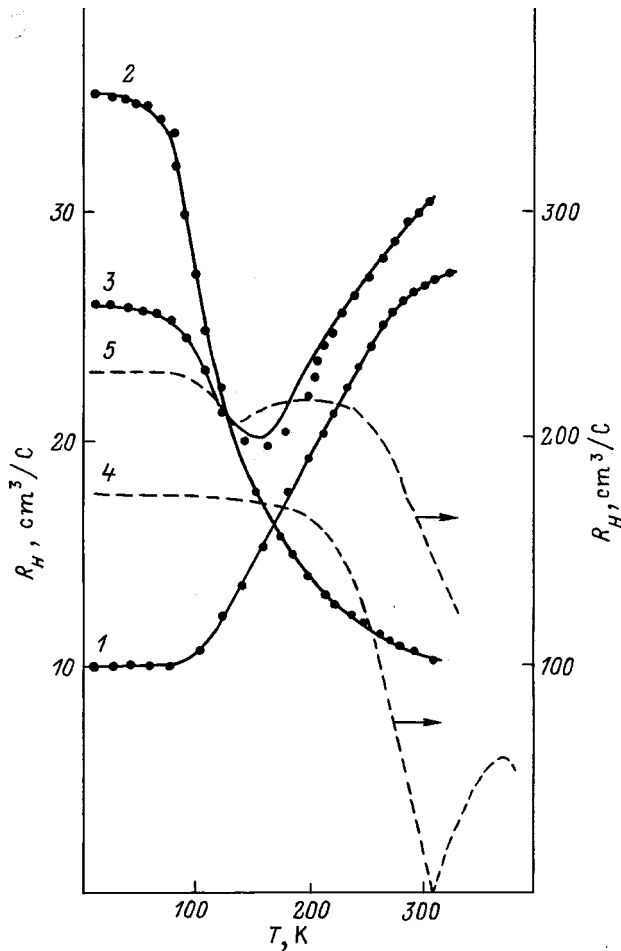


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента Холла пленок PbTe, выращенных в различных технологических условиях. Точки — эксперимент, пунктирная линия — огибающая экспериментальные точки, сплошные линии — расчет. 1 — n -PbTe/KCl, $W = 5.0 \cdot 10^4$ Вт/см², $T_s = 150^\circ\text{C}$; 2 — n -PbTe/KCl, $W = 8.5 \cdot 10^4$ Вт/см², $T_s = 335^\circ\text{C}$; 3 — n -PbTe/KCl, $W = 8.5 \cdot 10^4$ Вт/см², $T_s = 400^\circ\text{C}$; 4 — n -PbTe/KCl, $W = 8.5 \cdot 10^4$ Вт/см², $T_s = 300^\circ\text{C}$; 5 — p -PbTe/KBr, $W = 3.5 \cdot 10^4$ Вт/см², $T_s = 150^\circ\text{C}$.

концентрация не превышает $N_{d2} \leq 10^{15}$ см⁻³, поэтому уровень E_2 даже при самых низких концентрациях носителей тока проявляется крайне слабо.

В области температур эпитаксии, незначительно превышающей температуру повторной инверсии типа проводимости $p \rightarrow n$ ($T_s \geq 330^\circ\text{C}$) в $R_H(T)$ n -PbTe, вклад в проводимость вносят и E_1 и E_2 (рис. 1, кривая 2). С ростом T_s плотность состояний на уровне E_1 падает, а на уровне E_2 растет (рис. 2), что и определяет поведение коэффициента Холла $R_H(T)$.

Анализ экспериментальных данных по эффекту Холла, проведенный в двухуровневой модели, в предположении, что вид волновых функций для обоих уровней является s -типа, дал положение уровня $E_1 = 0.075$ эВ и $E_2 = -0.055$ эВ при $T = 0$ К. Изменение полоения уровней E_1 и E_2 с температурой $dE_1/dT = (4.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-4} T$

и $dE_2/dT = (3.5 \pm 0.7) \cdot 10^{-4} T$ соответственно. Энергетическое положение уровня E_1 зависит также от плотности состояний на уровне (рис. 3), которая в свою очередь возрастает с увеличением плотности мощности лазерного излучения на мишени. Такая зависимость положения уровня от плотности состояний на нем для соединений $A^{IV}B^{VI}$ является необычной. Теллурид свинца характеризуется большим значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon \geq 400$), поэтому волновые функции дефектных состояний до $N = 2$ ат.% слабо перекрываются, а радиус локализации не может заметно превышать величину одной-двух элементарных ячеек, т. е. волновые функции состояний примесных дефектов локализованы в области порядка 10–15 Å. В случае перекрытия волновых функций будет происходить понижение энергии уровня относительно зоны, отщепленным состоянием которой он является. В нашем случае плотность состояний на уровне значительно ниже 10^{20} см⁻³, поэтому говорить о перекрытии волновых функций не приходится.

С нашей точки зрения, такое поведение E_1 с увеличением плотности мощности лазерного излучения на мишени-источнике связано с тем, что ион свинца, встраиваясь в решетку, занимает междоузлие и тем самым создает локальную деформацию. В случае однородного распределения свинца в решетке возбуждаемые упругие поля будут пропорциональны концентрации точечных дефектов [1,2]. В пленках, полученных при низких температурах эпитаксии, напряжения могут быть значительными в отличие от пленок и кристаллов, выращенных при высоких температурах, когда напряжения практически

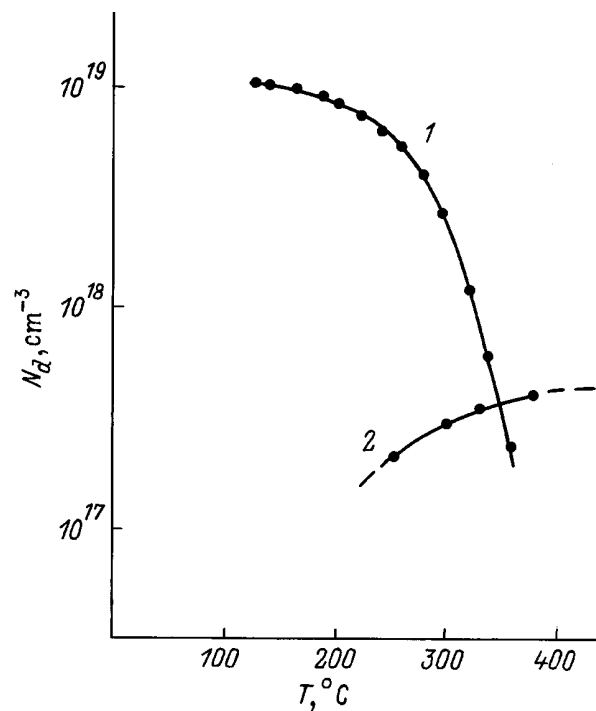


Рис. 2. Зависимость плотности состояний N_{d1} и N_{d2} от температуры эпитаксии пленок PbTe/KCl при $W = 8.5 \cdot 10^4$ Вт/см² (кривые 1 и 2 соответственно).

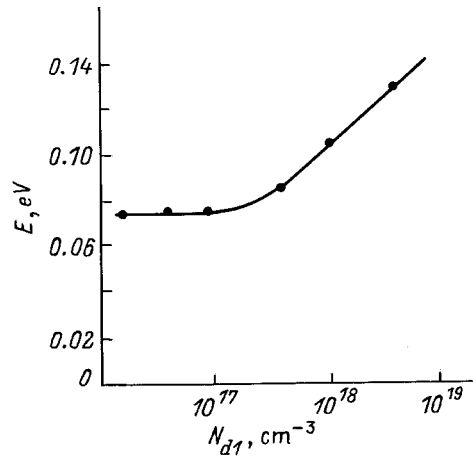


Рис. 3. Зависимость энергетического положения уровня E_1 от плотности состояний N_{d1} при 0 К.

полностью релаксируют и не дают ощутимого вклада в электрофизические свойства.

Увеличение упругой деформации влечет за собой изменение энергетического положения уровней дефектов, что и подтверждается в эксперименте. Аналогичное движение уровня дефектов в объемных монокристаллах PbSnTe происходит при облучении кристаллов ИК лазерным излучением, когда изменение концентрации носителей тока происходит за счет перераспределения точечных дефектов в "холодной" матрице в поле электромагнитной волны лазерного излучения [3–5]. В этом случае также возникают упругие поля, под действием которых уровень собственных дефектов изменяет свое энергетическое положение.

Относительно зарядового состояния межузельного свинца можно заметить, что все предыдущие работы, касающиеся этого вопроса, не дали конкретного ответа. Но несмотря на это в литературе устоялось мнение, что свинец в междоузлии находится в однократно заряженном состоянии. Однако эксперименты по исследованию электронного парамагнитного резонанса в области гелиевых температур не подтвердили это предположение. Поэтому, с нашей точки зрения, свинец, как марганец и европий, и в узле, и в междоузлии находится в двукратно заряженном состоянии [5], и поэтому в электронном парамагнитном резонансе не проявляется.

Происхождение же уровня в запрещенной зоне, по-видимому, обусловлено вакансиями Те. Однако следует отметить, что концентрация вакансий будет определяться не только температурой конденсации, но и особенностями выращивания пленок в условиях, далеких от равновесных, которые реализуются при использовании для распыления полупроводниковых мишеней источников лазерного излучения.

Таким образом, электрофизические свойства слоев, выращенных на диэлектрических подложках при использовании для распыления материала-источника PbTe модулированного ИК лазерного излучения, определяют-

ся в основном собственными электрически активными точечными дефектами, концентрация которых и энергетическое положение соответствующих уровней определяются как плотностью мощности лазерного излучения на мишени, так и температурой эпитаксиального роста.

Список литературы

- [1] S. Prussin. J. Appl. Phys., **32**, 1876 (1961).
- [2] В.А. Пантелеев, В.А. Муравьев. ФТТ, **19**, 682 (1977).
- [3] F.F. Sizov, S.V. Plyatsko, S.D. Darchuk. Infr. Phys., **27**, 249 (1987).
- [4] Ю.С. Громовой, Л.А. Коровина, С.В. Пляцко, Ф.Ф. Сизов, С.Д. Дарчук, С.А. Белоконь. ФТП, **24**, 250 (1990).
- [5] Yu.S. Gromovoj, S.V. Plyatsko, F.F. Sizov. Mater. Lett., **8**, 11-12, 495 (1989).

Редактор В.В. Чалдышев

Electrical properties of PbTe/KCl(KBr) layers grown by an epitaxy modulated by laser irradiation

S.V. Plyatsko

Institute of Semiconductor Physics,
Ukrainian Academy of Sciences,
252650 Kiev, the Ukraine

Abstract Electrical properties of PbTe/KCl(KBr) layers grown by a laser modulated IR irradiation epitaxy and their dependences on technological conditions (the power density of laser beam W , substrate temperature T_s) have been investigated. It is established that the $R_H(T)$ -dependences can be explained in the framework of a two-levels model, in which one of the levels E_{d1} is in the c -band and the second E_{d2} level is in the gap. The level energy position and the densities of states depend on growth conditions.