

Особенности фотопроводимости тонких эпитаксиальных слоев n -PbTe(Ga)

© Б.А. Акимов[¶], В.А. Богоявленский, Л.И. Рябова, В.Н. Васильков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Получена 20 сентября 2000 г. Принята к печати 3 ноября 2000 г.)

Представлены экспериментальные результаты исследования фотопроводимости и кинетических процессов в тонких (0.2–0.3 мкм) эпитаксиальных слоях n -PbTe(Ga), полученных методом "горячей стенки" на подложках BaF_2 (111). Фотоэлектрические свойства образцов были исследованы в температурном диапазоне 4.2–300 К в условиях импульсной (GaAs-светодиод) и непрерывной (миниатюрная лампа накаливания) инфракрасной подсветки. Наиболее важной характерной особенностью исследованных пленок является существенное увеличение температурного диапазона фоточувствительности. При плотности светового потока 10^5 – 10^4 Вт/см² температура, соответствующая появлению фоточувствительности T_C , достигала 150 К, что на 40 и 70 К превышает соответствующие значения для более толстых пленок (2–3 мкм) и высокоомных монокристаллов n -PbTe(Ga). Анализ кинетики фотопроводимости показывает, что в тонких слоях удалось реализовать равномерное по объему фотовозбуждение. Оценена величина рекомбинационного барьера для долговременных релаксационных процессов.

Введение

Легирование теллурида свинца галлием приводит к образованию глубоких примесных уровней в энергетическом спектре твердого раствора PbTe(Ga), обеспечивающих пиннинг уровня Ферми внутри запрещенной зоны — на 70 мэВ ниже дна зоны проводимости [1–3]. В области низких температур, $T < 80$ К, концентрация электронов в PbTe(Ga) близка к собственной, наблюдается высокая фоточувствительность и задержанная фотопроводимость. Это позволяет считать PbTe(Ga) материалом, перспективным для инфракрасной (ИК) оптоэлектроники, и использовать его в рабочих элементах лазеров, тепловизоров, детекторов и т. д., чувствительных в спектральной области 3–5 мкм [2,4,5].

Большинство публикаций, посвященных фотоэлектрическим свойствам PbTe(Ga) n -типа проводимости, описывают поведение монокристаллических образцов [6–9]. Синтез фоточувствительных пленок осложняется относительной узостью диапазона концентраций Ga, соответствующего диэлектрическому состоянию сплава [10]. Дополнительные затруднения обусловлены неомогенным распределением примеси: наличием сегрегации галлия в объеме образца [11]. Высокоомные пленки n -PbTe(Ga) были получены и исследованы сравнительно недавно. По данным [12,13] в эпитаксиальных слоях n -PbTe(Ga) толщиной 2–3 мкм температура появления задержанной фотопроводимости T_C повышается до 100–110 К и превышает на 30–40 К соответствующие значения для монокристаллических образцов [2,6]. В настоящей работе технология "горячей стенки" была дополнительно оптимизирована с целью получения более тонких (0.2–0.3 мкм) высокоомных эпитаксиальных слоев n -PbTe(Ga). Это дало возможность провести сравни-

тельный анализ фотоэлектрических характеристик пленок различной толщины и соответствующих параметров монокристаллических образцов.

Образцы и методика эксперимента

Эпитаксиальные пленки PbTe(Ga) n -типа проводимости были выращены методом "горячей стенки" на подложках BaF_2 , ориентированных вдоль кристаллографического направления (111). Состав исходной шихты для синтеза соответствовал 90% PbTe и 10% GaTe. Температурный режим в камере горячей стенки был задан таким образом, что фиксировалась температура "источника" 740°C, в то время как температура подложки варьировалась в пределах 180–200°C, с целью подобрать условия, соответствующие получению пленок с наиболее совершенной кристаллической структурой. Процедура роста продолжалась 4–6 ч, толщина полученных слоев составляла ~ 0.2 мкм. Структура выращенных пленок контролировалась электронной и акустической микроскопией, а также дифракционными методами.

Фотоэлектрические свойства пленок n -PbTe(Ga) были исследованы в температурном диапазоне 4.2–300 К с использованием низкотемпературной камеры, полностью экранирующей образцы от фонового излучения. В качестве источников ИК излучения применялись светодиод на основе GaAs (длина волны 1 мкм) и миниатюрная лампа накаливания. Интенсивность излучения колебалась от 10^{-5} Вт/см² для светодиода до 10^{-4} Вт/см² для лампы. Для приготовления омических контактов к образцам применялся сплав In + Ag(4 ат%) + Au(1 ат%).

Результаты измерений

Температурные зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ для пленки n -PbTe(Ga) толщиной 0.2 мкм приведены на рис. 1. Экспериментальные данные были

[¶] E-mail: akimov@mig.phys.msu.ru

Факс: (095)9328876

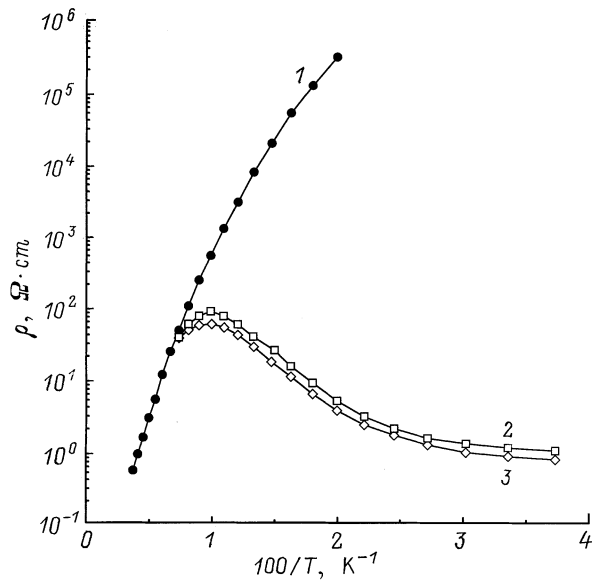


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ для пленки $n\text{-PbTe(Ga)}$ толщиной 0.2 мкм, измеренные в темноте (1), в условиях непрерывной ИК подсветки от светодиода (2) и от лампы накаливания (3).

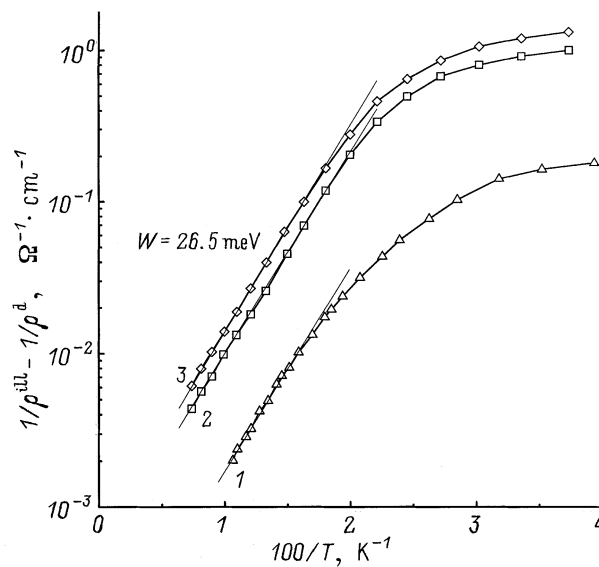


Рис. 2. Температурные зависимости изменения проводимости $(1/\rho^{ill} - 1/\rho^d)$ пленок $n\text{-PbTe(Ga)}$ толщиной 2 мкм при подсветке от лампы накаливания (1) и толщиной 0.2 мкм при подсветке от светодиода (2) и от лампы накаливания (3).

получены в темноте (кривая 1), а также при непрерывной подсветке светодиодом (кривая 2) или лампой накаливания (кривая 3). Как видно из приведенных данных, отношение сопротивления пленки в условиях экранирования от света и при подсветке ρ^d/ρ^{ill} существенно возрастает с понижением температуры образца ниже некоторого характерного значения $T_C = 150$ К, соответствующего появлению задержанной проводимости.

При $T = 100$ К отношение ρ^d/ρ^{ill} достигает 10, при 77 К — 10^3 , при 50 К — 10^5 . В условиях непрерывной подсветки спектр излучения источников и изменение интенсивности весьма незначительно влияют на форму зависимостей $\rho(T)$. Это позволяет предположить, что кривые, снятые в условиях подсветки, характеризуют максимальную чувствительность исследованных пленок в ИК области спектра.

На рис. 2 показано изменение проводимости в условиях подсветки по отношению к темновому значению $(1/\rho^{ill} - 1/\rho^d)$ в зависимости от обратной температуры для пленок $n\text{-PbTe(Ga)}$ разной толщины. Как видно из рисунка, изменение проводимости $(1/\rho^{ill} - 1/\rho^d)$ экспоненциально зависит от обратной температуры в достаточно широком диапазоне от $T = 50$ К (данная величина является общей для монокристаллических образцов $n\text{-PbTe(Ga)}$ и пленок) до характерной температуры T_C , которая возрастает при уменьшении толщины пленок от 100 до 150 К. Таким образом, для тонкой пленки $n\text{-PbTe(Ga)}$ наблюдаемая линейная зависимость $\lg(1/\rho^{ill} - 1/\rho^d)$ от $1/T$ реализуется в достаточно протяженном температурном интервале (см. кривые 2 и 3). С достаточно большой точностью можно считать, что экспоненциальное изменение проводимости пленок обусловлено изменением концентрации неравновесных электронов, определяющейся соотношением $\Delta n \propto \delta R/\tau$, где δR — скорость рекомбинации неравновесных носителей заряда, τ — характерное время рекомбинации. Полагая, что в области достаточно высоких температур, $T > 50$ К, в каждой точке величина δR равна скорости генерации, которая остается постоянной в условиях эксперимента, изменение Δn можно связать с температурной зависимостью времени рекомбинации $\tau \propto \exp(W/kT)$ и количественно оценить величину рекомбинационного барьера W для неравновесных носителей заряда по формуле

$$(1/\rho^{ill} - 1/\rho^d) \propto \exp(W/kT). \quad (1)$$

Определенная таким образом величина W составляет 26.5 мэВ.

Кинетические кривые спада фотопроводимости $\Delta\sigma(t)$ после воздействия импульсом подсветки от светодиода для пленок $n\text{-PbTe(Ga)}$ различной толщины приведены на рис. 3. Момент времени $t = 0$ соответствует окончанию подсветки. Наблюдаемые качественные различия между образцами различной толщины достаточно очевидны. Во-первых, проводимость толстой пленки $n\text{-PbTe(Ga)}$ релаксирует к равновесному значению значительно быстрее, чем проводимость тонкой. Во-вторых, кинетическая кривая для толстой пленки не спрямляется в координатах $\lg(\Delta\sigma) - t$, в отличие от классической экспоненциальной кинетики фотопроводимости для тонкого образца, описываемой соотношением

$$\Delta\sigma(t) \propto \exp(-t/\tau) \quad (2)$$

практически во всем временном интервале, за исключением короткого быстрого участка в самом начале.

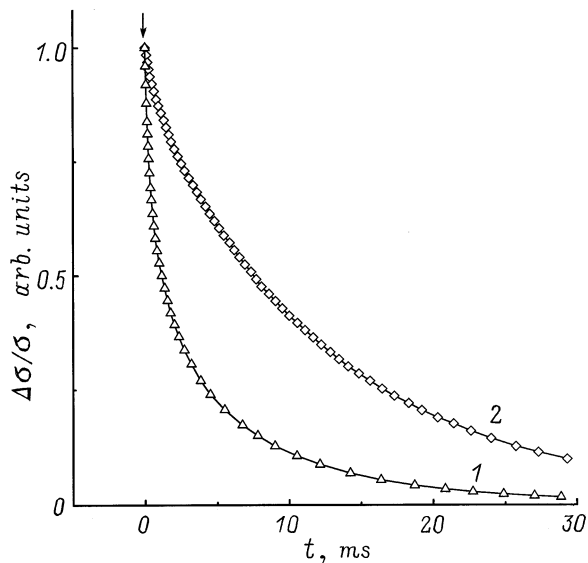


Рис. 3. Кинетические кривые спада фотопроводимости $\Delta\sigma(t)/\sigma$ для пленок $n\text{-PbTe}(\text{Ga})$ толщиной 2 (1) и 0.2 мкм (2), полученные после воздействия импульсом излучения светодиода продолжительностью 10 мс. $T = 4.2\text{ K}$.

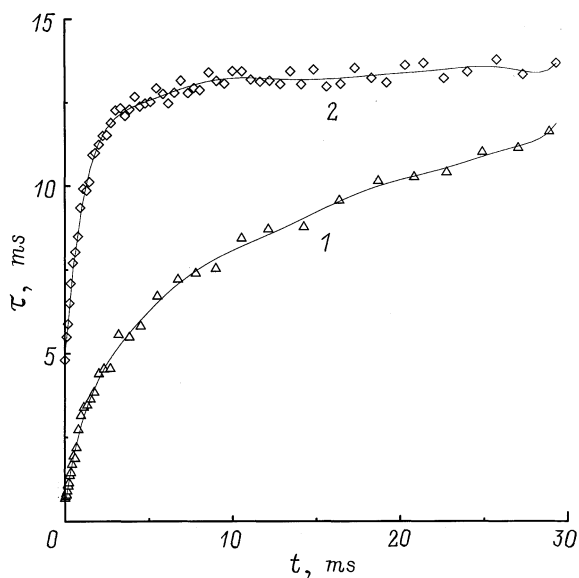


Рис. 4. Изменение мгновенного времени релаксации неравновесных носителей заряда $\tau(t)$, рассчитанное с использованием соотношения (3), в течение релаксационного процесса (см. рис. 3) пленок $n\text{-PbTe}(\text{Ga})$ толщиной 2 (1) и 0.2 мкм (2).

Для количественного сравнения кинетических характеристик фотопроводимости пленок различной толщины были рассчитаны мгновенные времена релаксации

$$\tau(t) = \Delta\sigma / (-\partial\sigma/\partial t). \quad (3)$$

Полученные результаты представлены на рис. 4: кривые 1 и 2 построены для толстой и тонкой пленок соответственно. Для тонкого образца мгновенное время

релаксации быстро (за $t < 10$ мс) достигает значения $\tau \approx 13$ мс и затем остается практически неизменным. Кривая $\tau(t)$ для толстой пленки характеризуется постоянным ростом τ в течение всего релаксационного процесса; асимптотический предел этой зависимости, возможно, соответствует тому же самому значению $\tau = 13$ мс, как и в случае тонкой пленки.

Обсуждение результатов

Как установлено в ходе предыдущих экспериментальных исследований [6,7,12,13], кинетика фотопроводимости в $n\text{-PbTe}(\text{Ga})$ достаточно сложна. В первом приближении ее можно качественно представить в виде суперпозиции быстрого и медленного процессов. При этом амплитуды быстрой и медленной релаксации зависят не только от интенсивности и длительности предшествующего светового возбуждения, но и от порядка проведения эксперимента, т. е. от режима нагрева–охлаждения. В полупроводниках, легированных примесями с переменной валентностью, скорости рекомбинации одновременно зависят от концентраций неравновесных носителей заряда и примесных центров в определенном зарядовом состоянии [7,13]. Поэтому неравномерное распределение неравновесных носителей в объеме в сочетании с неоднородным распределением примесных центров в разных зарядовых состояниях может приводить к неэквивалентным условиям для рекомбинации разных групп носителей, существенной модификации кинетических процессов, отражающейся в неэкспоненциальном характере наблюдающихся релаксационных кривых. В объемных образцах диффузия неравновесных носителей от поверхности в глубь кристалла может рассматриваться как фактор, реально влияющий на вид релаксационных кривых. При анализе релаксационных процессов следует учитывать, что в $n\text{-PbTe}(\text{Ga})$ медленные процессы доминируют в условиях высокого уровня возбуждения, а сравнительно быстрая релаксация наблюдается при слабой импульсной подсветке. Как отмечается в [13], это обстоятельство может быть обусловлено тем, что при высоких значениях концентраций неравновесных электронов количество метастабильных примесных центров, отвечающих процессу одноэлектронного захвата, мало по сравнению с количеством примесных центров в основном состоянии (двухэлектронный захват). Диффузия неравновесных электронов в глубь кристалла дает дополнительную возможность электронам "найти" метастабильный центр и рекомбинировать. По-видимому, процесс диффузии существен не только в объемных монокристаллах, но и в пленках толщиной 2–3 мкм. С этим может быть связано меньшие значения $\tau(t)$ для пленок большей толщины (см. рис. 4). Можно полагать, что, поскольку экспоненциальные переходные процессы наблюдаются лишь в наиболее тонких пленках, условия однородного по объему возбуждения реализуются только в данных образцах. Таким образом, полученные в настоя-

шей работе экспериментальные результаты показывают, что в тонких пленках фактор, связанный с диффузией и неравномерным распределением неравновесных носителей в объеме, устранен.

Эффект задержанной фотопроводимости, имеющий место при температурах ниже T_C , является доминирующим вплоть до температур ~ 50 К. Барьер W , определенный в области температур $50 \text{ К} < T < T_C$, характеризует медленный релаксационный процесс в условиях сильной подсветки. При этом следует отметить, что от толщины образца зависит только величина T_C , а температура, при которой наблюдается насыщение на кривых $\rho(T)$, измеренных в условиях подсветки, для всех исследованных образцов остается приблизительно постоянной. В области $T < 50$ К накопление неравновесных носителей заряда прекращается, хотя время медленной релаксации должно продолжать экспоненциально нарастать. Об этом, в частности, свидетельствует то, что после выключения постоянной сильной подсветки при гелиевых температурах наблюдается полная задержанная фотопроводимость. Для оценки характерного времени релаксации τ медленного процесса при $T = 50$ К было использовано соотношение $\tau = \tau_0 \exp(W/kT)$, где τ_0 полагалось $\sim 10^{-8}$ с (характерное время межзонной рекомбинации в нелегированном PbTe). Полученное значение $\tau(T = 50 \text{ К}) \sim 10$ мкс с большой точностью совпало с характерными временами отрицательной фотопроводимости, обнаруженной в работе [14] при исследовании сравнительно низкоомных пленок n -PbTe(Ga), в которых содержание галлия было несколько выше, чем в образцах со стабилизированным положением уровня Ферми. Нельзя исключить, что наличие насыщения на низкотемпературном участке кривых $\rho(T)$ обусловлено суперпозицией отрицательной и положительной фотопроводимости. В случае повышенного уровня легирования отрицательная фотопроводимость абсолютна [14], в высокоомных образцах n -PbTe(Ga) ее присутствие приводит лишь к частичному гашению положительной фотопроводимости.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты № 98-02-17317 и 99-02-17531.

Список литературы

- [1] G. Nimtz, B. Schlicht. *Narrow Gap Semiconductors*, ed. by G. Hohler (Springer Verlag, Berlin, 1983).
- [2] B.A. Akimov, A.V. Dmitriev, D.R. Khokhlov, L.I. Ryabova. *Phys. St. Sol. (a)*, **137**, 9 (1993).
- [3] *Lead Chalcogenides: Physics and Applications*, ed. by D. Khokhlov (Gordon and Breach, N. Y., 2000).
- [4] J. Masek, T.J. Hoshino, C. Maissen, H. Zogg, S. Blunier, J.P. Vermeiren, C.L. Claeys. *Proc. SPIE*, **1735**, 54 (1992).
- [5] H. Zogg, A. Fash, C. Maissen, J. Masek, S. Blunier. *Opt. Eng.*, **33**, 1440 (1994).
- [6] Б.А. Акимов, А.В. Албул, В.Ю. Ильин, М.Ю. Некрасов, Л.И. Рябова. *ФТП*, **29**, 2015 (1995).
- [7] Б.А. Акимов, А.В. Албул, Л.И. Рябова. *ФТП*, **29**, 2158 (1995).
- [8] А.И. Белогорохов, И.И. Иванчик, С.В. Пономарев, Е.И. Слынько, Д.Р. Хохлов. *Письма ЖЭТФ*, **63**, 342 (1996).
- [9] А.И. Белогорохов, И.И. Иванчик, З. Попович, Н. Ромчевич, Д.Р. Хохлов. *ФТП*, **32**, 679 (1998).
- [10] С.А. Белоконь, Л.Н. Верещагина, И.И. Иванчик, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. *ФТП*, **26**, 264 (1992).
- [11] B.A. Akimov, A.M. Gaskov, V.N. Glonty, I.I. Ivanchik, F.N. Putilin. *Phys. St. Sol. (a)*, **142**, 85 (1994).
- [12] B.A. Akimov, V.A. Bogoyavlenskiy, L.I. Ryabova, V.N. Vasil'kov. *Proc. SPIE*, **3890**, 212 (1999).
- [13] B.A. Akimov, V.A. Bogoyavlenskiy, L.I. Ryabova, V.N. Vasil'kov, S.P. Zimin. *Semicond. Sci. Technol.*, **14**, 679 (1999).
- [14] B.A. Akimov, V.A. Bogoyavlenskiy, L.I. Ryabova, V.N. Vasil'kov. *Phys. Rev. B*, **61**, 16 045 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoconductivity peculiarities in thin epitaxial layers of n -PbTe(Ga)

B.A. Akimov, V.A. Bogoyavlenskiy, L.I. Ryabova, V.N. Vasil'kov

M.V. Lomonosov Moscow State University, 119899 Moscow, Russia

Abstract We present the studies of photoconductivity and transient processes in n -PbTe(Ga) epitaxial films of thickness $\sim 0.2 \mu\text{m}$ prepared by the hot wall technique on (111)-oriented BaF₂ substrates. Photoelectric properties are investigated in the temperature range 4.2–300 K under infrared illumination by GaAs light-emitting diode with $\lambda = 1 \mu\text{m}$ and by a white light lamp. The low-temperature measurements reveal the infrared photoconductivity threshold at $T_C = 150$ K (for the flux density $10^{-5} - 10^{-4} \text{ W/cm}^2$), that exceeds by 40 and 70 K the temperatures relevant to more thick films ($\sim 2 \mu\text{m}$) and to single crystals, respectively. This substantial increase of T_C in thin films gives us an opportunity to estimate the recombination barrier of Ga impurity in PbTe.