

©1994 г.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $\text{PbTe}(\text{Ga})$, ОБЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОНАМИ

*Е.П. Скупетров, А.Н. Некрасова, Д.В. Пелегов,
Л.И. Рябова, В.И. Сидоров*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899, Москва, Россия
(Получена 17 февраля 1994 г. Принята к печати 18 марта 1994 г.)

Исследовано влияние глубокого облучения электронами (температура $T \approx 300$ К, энергия электронов $E = 6$ МэВ, доза $\Phi \leq 3 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$) на электрофизические и фотоэлектрические свойства монокристаллов n - и p - PbTe , легированных галлием в концентрации $C_{\text{Ga}} = 0.1 \div 0.4$ ат%. В образцах p - $\text{PbTe}(\text{Ga})$ обнаружены уменьшение концентрации дырок, p - n -инверсия и переход в диэлектрическое состояние под действием облучения. Показано, что в диэлектрическом состоянии образцы $\text{PbTe}(\text{Ga})$ обладают повышенной радиационной стойкостью электрофизических и фотоэлектрических параметров независимо от того, было ли это состояние достигнуто в процессе легирования (образцы n -типа проводимости) или индуцировано облучением (образцы p -типа проводимости).

Введение

В ряду легированных твердых растворов на основе теллурида свинца со стабилизированным уровнем Ферми E_F $\text{PbTe}(\text{Ga})$ занимает особое место. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, E_F в этом соединении стабилизируется внутри запрещенной зоны, что приводит к понижению концентрации носителей заряда до значений, близких к собственным. Во-вторых, эффект задержанной фотопроводимости наблюдается при температурах $T < T_c \approx 80$ К [1,2]. Столь высокое значение критической температуры T_c характерно только для легированных галлием теллурида свинца и некоторых твердых растворов на его основе. Использование в качестве легирующей добавки In в аналогичных соединениях приводит к появлению задержанной ФП при существенно более низкой температуре $T_c \approx 20$ К [1-3].

Следует отметить, что в $\text{PbTe}(\text{Ga})$ эффект пиннинга уровня Ферми реализуется лишь в достаточно узком интервале составов по концентрации введенного Ga , N_{Ga} . Более того, значения N_{Ga} , соответствующие стабилизации уровня Ферми в кристаллах $\text{PbTe}(\text{Ga})$, определенные разными авторами при использовании разных методов синтеза,

довольно сильно различаются (см. [1] и ссылки в этой работе). Анализ характера примесных состояний Ga в PbTe(Ga) осложняется еще и тем, что галлий в высокоомных кристаллах распределен неравномерно по объему. Сегрегация примеси наблюдается на различных дефектах кристаллической решетки, и практически невозможно определить концентрацию электрически активного Ga в объеме образца [4,5].

В отличие от обычного легирования PbTe, когда примесь вводится либо в ростовую шихту, либо посредством отжига в парах легирующего компонента, облучение быстрыми электронами позволяет изменять концентрации электрически активных дефектов плавно и однородно по объему образца. Более того, путем вариации потока облучения можно контролировать соотношение концентрации различных типов дефектов. В работах [6,7] было показано, что при электронном облучении $p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ происходит уменьшение концентрации дырок в результате генерации электрически активных дефектов как донорного, так и акцепторного типа. При высоких дозах облучения наблюдались стабилизация уровня Ферми в пределах запрещенной зоны и переход сплавов в диэлектрическое состояние. Предполагалось, что облученные электронами сплавы могут обладать повышенной фоточувствительностью и радиационной стойкостью параметров. Особенности поведения Ga и PbTe позволяют надеяться, что облучение быстрыми электронами может оказаться чрезвычайно эффективным с точки зрения модификации свойств исходного соединения и выяснения характера легирующего действия Ga. Поэтому представляло интерес исследовать влияние глубокого электронного облучения на электрофизические и фотоэлектрические характеристики монокристаллов PbTe(Ga) с целью выяснения возможности управления их свойствами с помощью облучения и, в частности, возможности достижения диэлектрического состояния при облучении $p\text{-PbTe(Ga)}$, а также оценки радиационной стойкости электрофизических и фотоэлектрических параметров этих полупроводников в диэлектрической фазе.

1. Методика измерения и образцы

В настоящей работе исследовались монокристаллические образцы PbTe, выращенного методом Чохральского и легированного различным количеством Ga в процессе роста. Потенциальные холловские и токовые контакты к образцам изготавливались из луженой индийе медной проволоки диаметром 0.05 мм. Токовые контакты припаивались к торцам образцов сплавом $\text{In} + 4\% \text{Ag} + 1\% \text{Au}$, а потенциальные и холловские контакты приваривались к образцу с помощью электроискровой установки.

Исходные образцы, параметры которых приведены в таблице (концентрация галлия C_{Ga} соответствует загрузке в ростовую шихту), облучались при комнатной температуре быстрыми электронами (энергия электронов $E = 6 \text{ МэВ}$, доза $\Phi \leq 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) на линейном ускорителе электронов «Электроника» ЭЛУ-6. Интенсивность облучения ($d\Phi/dt \approx 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) выбиралась таким образом, чтобы перегрев образцов относительно комнатной температуры не превышал 30 К. У каждого образца до и после нескольких потоков облучения измерялись

Исходные параметры исследованных образцов $\text{PbTe}(\text{Ga})$ при $T = 78$ К и максимальные дозы облучения

Образец	C_{Ga} , ат%	Тип проводимости	N , см^{-3}	μ_H , $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\Phi \cdot 10^{-17}$, см^{-2}
Ga-0.1	0.1	<i>p</i>	$1.0 \cdot 10^{15}$	$7.3 \cdot 10^3$	3.0
Ga-0.2	0.2	<i>p</i>	$5.7 \cdot 10^{15}$	$3.5 \cdot 10^3$	2.9
Ga-0.2M	0.25	<i>p</i>	$8.5 \cdot 10^{14}$	$3.4 \cdot 10^2$	0.6
Ga-0.4	0.4	<i>n</i>	$1.2 \cdot 10^{12}$	$1.3 \cdot 10^4$	2.3

Примечание. N — концентрация носителей заряда, μ_H — подвижность.

температурные зависимости удельного сопротивления ρ и коэффициента Холла R_H ($4.2 \leq T \leq 300$ К, $B \leq 0.06$ Т) в условиях экранировки от внешнего излучения и контролируемой инфракрасной (ИК) подсветки. Также исследовались долговременные релаксационные процессы, индуцированные ИК подсветкой.

Экспериментальная установка позволяла исследовать образцы в условиях подсветки ИК излучением от теплового источника и светодиода. В первом случае в качестве излучателя использовалось угольное сопротивление фирмы «Allen-Bready», помещенное в сферу из мелкодисперсного графита диаметром ~ 3 мм, разогретое протекающим через него током до температуры T^* . Капсула с излучателем помещалась в вакуумируемой ампуле на расстоянии ~ 50 мм от образца, а температура T^* излучателя определялась по сопротивлению резистора «Allen-Bready». Во втором случае в качестве излучателя использовался светодиод АЛ107Б ($\lambda \approx 1$ мкм), расположенный вне ампулы непосредственно в жидком гелии и освещающий образец через окно из лейкосапфира, вклеенное с помощью эпоксидного клея в дно ампулы.

2. Гальваномагнитные явления в $\text{PbTe}(\text{Ga})$, облученном электронами

Исследованные образцы можно разделить на две группы. Первую группу составляют образцы *p*-типа проводимости с различной степенью компенсации собственных дефектов акцепторного типа донорной примесью галлия (см. таблицу). На температурных зависимостях удельного сопротивления и коэффициента Холла этих образцов наблюдается активационный участок, существование которого обычно связывается с ионизацией глубокого уровня галлия (рис. 1). Энергия активации, определенная по углу наклона зависимостей $\ln \rho$ от $1/T$, составляет $E_a = 20 \div 25$ МэВ ($\rho = \rho_0 \exp(E_a/kT)$).

Под действием электронного облучения происходит монотонное увеличение удельного сопротивления и коэффициента Холла при низких температурах и *p*-*n*-инверсия при некоторой дозе облучения $\Phi = \Phi^*$. Необходимо отметить, что дальнейшее облучение почти не изменяет параметры исследованных образцов во всем исследованном диапазоне температур, а величина критической дозы Φ^* определяется концентрацией примеси галлия в образцах: чем больше концентрация примеси галлия C_{Ga} в образце, тем меньше значение Φ^* . С ростом

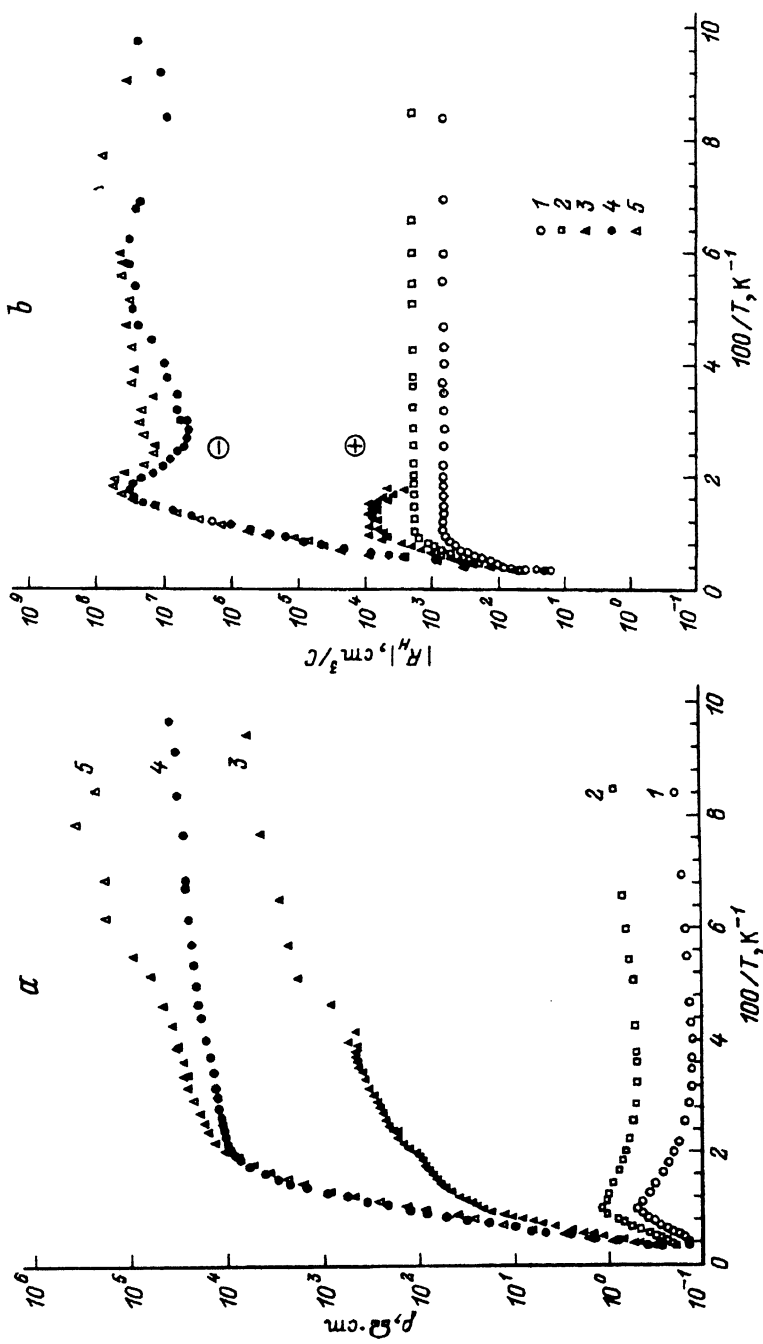


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (b) образца Ga-0.2, облученного электронами. $\Phi \cdot 10^{-17}$, см^{-2} : 1 — 0, 2 — 0.49, 3 — 1.17, 4 — 2.29, 5 — 2.9.

дозы облучения происходит увеличение энергии активации E_a в несколько раз и при $\Phi > \Phi^*$ она достигает типичного для высокоомных кристаллов $\text{PbTe}(\text{Ga})$ n -типа проводимости значения $E_a = 65 \div 80$ МэВ.

Указанные экспериментальные результаты позволяют считать, что электронное облучение кристаллов p - $\text{PbTe}(\text{Ga})$, генерируя дефекты в основном донорного типа, вызывает дополнительную компенсацию исследованных кристаллов и переводит их из «металлического» состояния (p -область) в диэлектрическое состояние с n -типом проводимости, в котором параметры образцов слабо зависят от потока облучения.

Анализ полученных результатов позволяет выделить две характерные особенности перехода исследованных образцов в диэлектрическое состояние.

Во-первых, в окрестности точки p - n -инверсии на температурных зависимостях коэффициента Холла наблюдается ряд аномалий: резкое уменьшение коэффициента Холла, исчезновение сигнала с холловских контактов или появление нескольких точек инверсии знака коэффициента Холла в области низких температур. По нашему мнению, эти аномалии связаны с сильной компенсацией и, по-видимому, с заметной неоднородностью исследуемых кристаллов. Полученный результат находится в хорошем согласии с данными работы [8], где показано, что образцы $\text{PbTe}(\text{Ga})$ p -типа проводимости характеризуются неоднородностью легирования вблизи точки инверсии типа проводимости.

Во-вторых, под действием электронного облучения происходит изменение наклона активационных участков на зависимостях $\rho(1/T)$, $R_H(1/T)$. С ростом дозы облучения энергия активации E_a увеличивается в несколько раз и лишь при $\Phi > \Phi^*$ ее значение достигает типичной для высокоомных кристаллов $\text{PbTe}(\text{Ga})$ n -типа проводимости величины $E_a = 65 \div 80$ МэВ. Такое поведение энергии активации E_a при облучении не позволяет однозначно связывать существование активационного участка на зависимостях $\rho(1/T)$, $R_H(1/T)$ с наличием единственного глубокого уровня галлия в запрещенной зоне PbTe , поскольку трудно представить себе механизм увеличения энергии ионизации примесного уровня под действием электронного облучения. Возможность разумного объяснения поведения E_a при облучении появляется, если предположить существование в запрещенной зоне нескольких различных глубоких уровней. В этом случае независимо от конкретной причины появления этих уровней (существование многозарядных примесных центров галлия, наличие уровней собственных дефектов, возникновение уровней радиационных дефектов) с изменением положения уровня Ферми при облучении наклон активационного участка на температурных зависимостях удельного сопротивления и коэффициента Холла может изменяться и определяться энергиями ионизации разных глубоких уровней [9].

Вторую группу представляет высокоомный образец n -типа проводимости с наибольшей концентрацией галлия $\text{Ga}-0.4$ (см. таблицу). Концентрация электронов в этом образце при $T \approx 78$ К близка к собственной, поэтому можно считать, что он находится в диэлектрическом состоянии. Энергия активации E_a для этого образца составляет ~ 55 МэВ, а в области высоких температур ($T \geq 250$ К) на температурных зависимостях удельного сопротивления и коэффициента Холла наблюдается активационный участок, обусловленный собственной ионизацией носителей заряда (рис. 2).

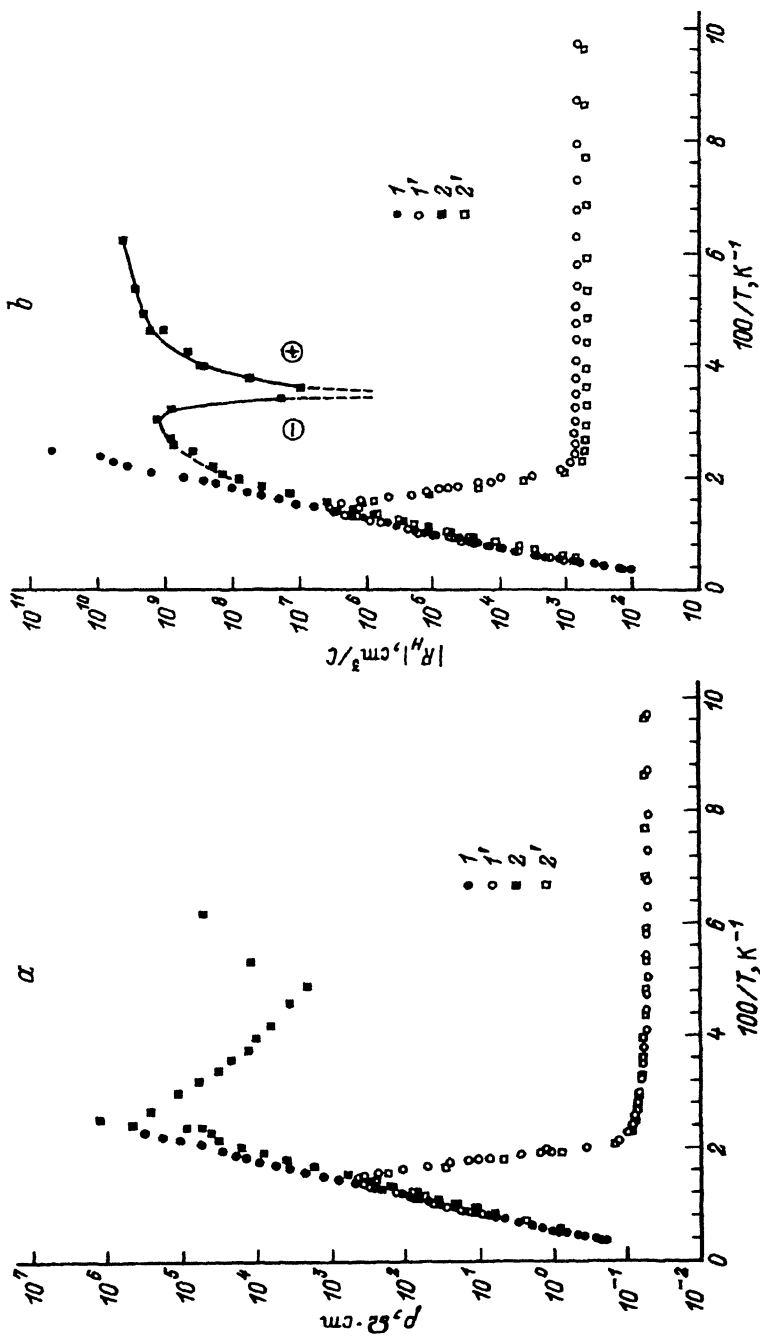


Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) образца Ga-0.4 в условиях экранировки внешнего излучения (1, 2) и подсветки светодиодом АЛ107В (1', 2'). $\Phi \cdot 10^{-17}$, см^{-2} ; 1, 1' — 0.1; 2, 2' — 2.28.

Электронное облучение почти не изменяет электрофизические параметры образца Ga-0.4 во всем исследованном диапазоне температур, что хорошо вписывается в картину, полученную для образцов первой группы, и соответствует их поведению после перехода в диэлектрическое состояние. И лишь при максимальных дозах облучения ($\Phi > 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) в области низких температур наблюдаются заметное уменьшение удельного сопротивления и n - p -инверсия знака коэффициента Холла при понижении температуры. Такие температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла характерны для высокоомных компенсированных полупроводников с инверсионным слоем на поверхности кристалла. Поэтому можно предположить, что электронное облучение приводит к образованию на поверхности кристалла n -PbTe(Ga) слоя p -типа проводимости, шунтирующего при низких температурах высокоомный объем образца. Вполне возможно, что образование такого слоя связано с интенсивным окислением поверхности кристалла при длительной ($t > 20 \text{ ч}$) радиационной обработке образца.

3. Фотоэлектрические явления и долговременные релаксационные процессы в PbTe(Ga), облученном электронами

Важным свойством PbTe, легированного Ga, является высокая чувствительность к подсветке излучением ИК диапазона при низких температурах вплоть до некоторой критической температуры $T_c = 70 \div 80 \text{ K}$.

Установлено, что все исследованные в настоящей работе образцы PbTe(Ga) обладают фоточувствительностью в области низких температур. При подсветке источником ИК излучения удельное сопротивление исходных кристаллов уменьшается, причем при постоянной интенсивности подсветки фотоотклик увеличивается с ростом содержания Ga в образце (с ростом степени компенсации образца). В образцах p -PbTe(Ga), относящихся к первой группе, удельное сопротивление уменьшается на 1–3 порядка, а максимальная фоточувствительность обнаружена у образца p -PbTe(Ga) второй группы, находящегося в диэлектрическом состоянии (рис. 2). При включении ИК светодиода ФЛ107Б (ток $\sim 15 \text{ mA}$) удельное сопротивление и коэффициент Холла этого образца при низких температурах уменьшаются по крайней мере на 7 порядков.

Под действием электронного облучения удельное сопротивление образцов первой группы при низких температурах (как в условиях экранировки внешнего излучения, так и в условиях ИК подсветки) и величина фотопроводимости увеличиваются. В высокоомном образце второй группы электронное облучение практически не влияет на температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла в условиях ИК подсветки (рис. 2). Однако фотопроводимость в области низких температур заметно уменьшается в результате появления на поверхности образца слоя p -типа проводимости, шунтирующего объем кристалла.

Во всех исследованных образцах фотопроводимость является задержанной, а релаксационные процессы как при включении, так и при выключении возбуждения носят долговременный характер (рис. 3, 4).

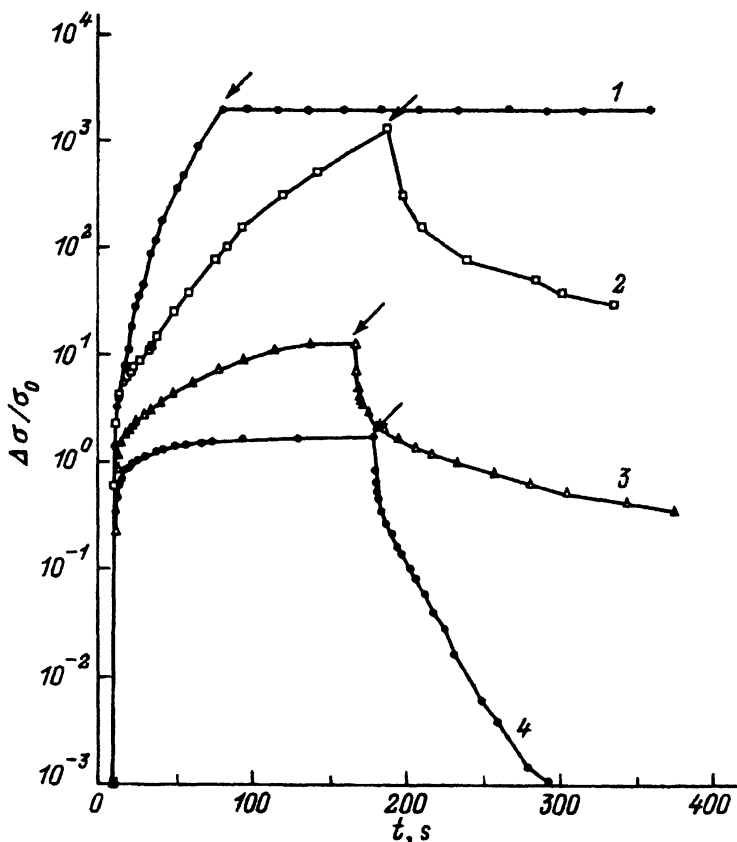


Рис. 3. Кинетика фотопроводимости образца Ga-0.4 при подсветке светодионом АЛ107В (ток 15 мА).
 T , К: 1 — 39, 2 — 54, 3 — 58.8, 4 — 64.2.

Известно [1,2,10], что кинетика фотопроводимости в образцах РbTe(Ga) достаточно сложна и характеризуется наличием по крайней мере двух участков спада с существенно отличающимися временами. В настоящей работе не ставилась задача подробно исследовать характеристики кинетических процессов, которые определяются многими параметрами, в том числе степенью выведения системы из состояния равновесия (т.е. интенсивностью и длительностью подсветки). При этом представляло интерес сравнить кинетику фотопроводимости в кристаллах первой и второй групп. Для этого были поставлены эксперименты, в которых разные образцы были измерены в идентичных условиях. Сравнение полученных данных показывает, что для сплавов из разных групп кинетические кривые заметно различаются.

Во-первых, относительная величина сигнала фотопроводимости $\Delta\sigma/\sigma_0$ при всех фиксированных температурах в образцах второй группы на несколько порядков выше. Во-вторых, в области низких температур ($T < 50$ К) насыщение на кривых $\Delta\sigma/\sigma_0(t)$ для образцов второй группы как при включении, так и при выключении ИК подсветки за время проведения эксперимента не было достигнуто, в то время как

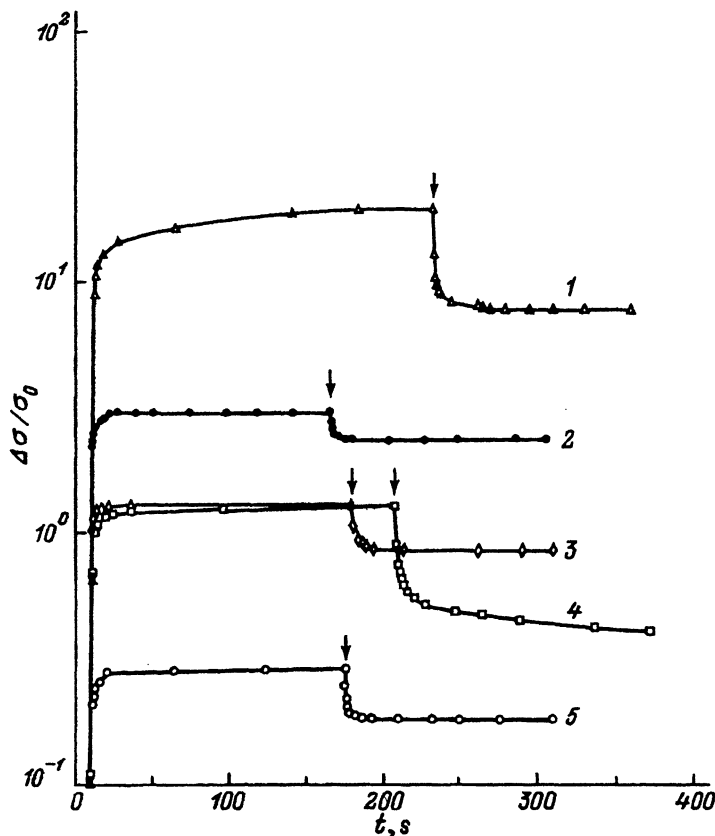


Рис. 4. Кинетика фотопроводимости образца Ga-0.2M при подсветке светодионом АЛ107Б (ток 15 мА).

T, K : 1 — 4.2, 2 — 18.8, 3 — 24.2, 4 — 37.3, 5 — 60.1.

в кристаллах p -типа проводимости насыщение устанавливалось в течение времени $t < 10^2$ с. И наконец, релаксация сигнала фотопроводимости к равновесному значению после выключения подсветки во всех случаях имела неэкспоненциальный характер, однако качественно различалась для образцов n - и p -типа проводимости. Так, в образце n -PbTe(Ga) в области низких температур ($T < 50$ K) значение σ после выключения подсветки практически не изменяется в течение неопределенно длительного времени, но с ростом T спад σ является монотонным. В p -PbTe(Ga) во всем температурном диапазоне σ после выключения подсветки достигает насыщения за время $t < 10^2$ с, но не возвращается к исходному темновому значению.

Закключение

Таким образом, в настоящей работе показано, что облучение кристаллов PbTe(Ga) быстрыми электронами приводит к генерации дефектов преимущественно донорного типа. Это позволяет использовать предложенную методику для дополнительного легирования p -PbTe(Ga) с целью получения высокоомных фоточувствительных кристаллов. В

то же время установлено, что в широком диапазоне потоков облучения электронное облучение практически не влияет на свойства высокоомного n -PbTe(Ga), что подтверждает существование эффекта стабилизации уровня Ферми в этих кристаллах, обуславливающего высокую радиационную стойкость их электрофизических и фотоэлектрических параметров.

Авторы благодарны С.А.Белоконю за предоставление образцов для исследований.

Список литературы

- [1] Б.А. Акимов, В.П. Зломанов, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. *Высокочистые вещества*, вып. № 6, 22 (1991).
- [2] В.А. Акимов, А.В. Dmitriev, D.R. Khokhlov, L.I. Ryabova. *Phys. St. Sol. (a)*, **137**, 9 (1993).
- [3] В.И. Кайданов, Ю.И. Равич. *УФН*, **145**, 51 (1985).
- [4] Г.С. Бушмарина, Б.Ф. Грузинов, И.А. Дрaбкин, Е.Я. Лев, И.В. Нельсон. *ФТП*, **11**, 1874 (1977).
- [5] А.М. Гаськов, Н.Г. Лисина, В.П. Зломанов, А.В. Новоселова. *ДАН СССР*, **261**, 95 (1981).
- [6] Н.Б. Брандт, Е.П. Скипетров, Е.И. Слынько, А.Г. Хорош, В.И. Штанов. *ФТП*, **24**, 51 (1990).
- [7] Н.Б. Брандт, Е.П. Скипетров, А.Г. Хорош. *ФТП*, **26**, 888 (1992).
- [8] С.А. Белоконь, Л.Н. Верещагина, И.И. Иванчик, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. *ФТП*, **26**, 264 (1992).
- [9] Дж. Блекмор. *Статистика электронов в полупроводниках* (М., Мир, 1964).
- [10] Ф.Ф. Сизов, Ю.Г. Троян, Л.Ф. Линник. *УФЖ*, **30**, 1225 (1985).

Редактор Л.В. Шаронова
