

ПИКОСЕКУНДНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК РЬТЕ НА НЕОДНОРОДНЫХ И ОРИЕНТИРУЮЩИХ ПОДЛОЖКАХ

Вайткус Ю., Томашюнас Р., Тумквявичюс К.,
Пятраускас М., Мастейка Р.

Исследовано влияние поликристалличности структуры полупроводникового соединения РЬТЕ по сравнению с монокристаллом на релаксации концентрации ΔN неравновесных носителей заряда (ННЗ). Для пленок на ситалле корреляционным методом измеренное время релаксации ННЗ менее 17 пс. Показано, что в сильно возбужденных пленках ($\Delta N \geq 10^{17} \text{ см}^{-3}$) независимо от типа их подложек доминирующим механизмом рекомбинации ННЗ является межзонная оже-рекомбинация в объеме кристаллитов с коэффициентом $\gamma_A \approx 5 \cdot 10^{-28} \text{ см}^6/\text{с}$, который в 2 раза больше, чем в монокристаллах РЬТЕ. Определено влияние термообработки пленок на рекомбинацию ННЗ. Предложена модель рекомбинации носителей заряда в сильно возбужденных пленках РЬТЕ.

Полупроводники группы $A^{IV}B^{VI}$ известны тем, что неравновесное состояние при высоких уровнях возбуждения определяется собственными процессами — межзонной излучательной и оже-рекомбинациями. Это вызвано тем, что большая часть дефектов и примесей создает локальные уровни не в запрещенной, а в разрешенных зонах [1]. Так как поверхностные уровни в запрещенной зоне возникают при наличии деформации кристалла, можно управлять свойствами материалов при изготовлении их в поликристаллической фазе. Обычно в этих структурах существенную роль играют межкристаллические барьеры, обуславливающие инерционность и фоточувствительность поликристаллических слоев [2, 3], хотя, как показывают исследования [4, 5], возможно получение и субнаносекундных времен жизни. В настоящей работе изучены закономерности фотопроводимости в мелкокристаллических пленках теллурида свинца при высоких уровнях возбуждения. Получены пикосекундные времена жизни и показана доминирующая роль оже-рекомбинации с учетом неоднородности пленок.

Пленки толщиной $\sim 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ выращивались в вакууме $\sim 10^{-3} \text{ Па}$ испарением теллурида свинца на подложках ситалла и слюды.

Исследование нуклеации в начальных стадиях роста методом просвечивающей электронной микроскопии показало, что спекание и формирование границ происходит по островковому механизму. Свежеизготовленные пленки на ситалле состояли из многоугольных кристаллитов различных размеров (рис. 1), средняя величина которых $\bar{l} \approx 9.2 \cdot 10^{-6} \text{ см}$, а разброс (на полувысоте распределения) $\Delta \bar{l} \approx 8 \cdot 10^{-6} \text{ см}$. На слюде ($\bar{l} \approx 2.4 \cdot 10^{-5} \text{ см}$) разброс $\Delta \bar{l}$ значительно меньше, чем на ситалле, а межкристаллические границы менее выражены. Исследуемые образцы имели компланарную геометрию контактов, обеспечивающую согласование с микрополосковой линией 50 Ом. С помощью пикосекундного лазера ($\tau_L \approx 17 \text{ пс}$ — длительность одиночного импульса, $\lambda = 1.08 \text{ мкм}$ — длина волны излучения) в пленках возбуждались неравновесные носители заряда (ННЗ), с регистрирующего осциллографа С7-19 непосредственно снимались кинетики фотопроводимости. Из анализа кинетик были получены τ_m — мгновенные времена релаксации фотопроводимости. Энергия падающего на образец лазерного луча измерялась калориметром. Сверхбыстрые

релаксации фотопроводимости измерялись по корреляционной методике [6], где для генерации стробирующего электрического импульса был выбран фотопроводник на основе пленок CdTe. С использованием вычисленных и определенных величин ΔN и τ_m были построены зависимости $\tau_m = f(\Delta N)$ (рис. 2).

Измерения релаксации фотопроводимости проведены в диапазоне концентраций ННЗ $\Delta N = 10^{17} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Концентрация ННЗ определялась путем изме-

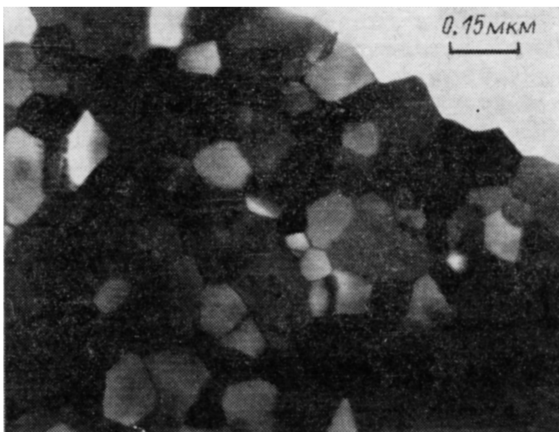


Рис. 1. Электронная микрофотография «на просвет» поликристаллической пленки теллурида свинца, выращенной на ситалле.

рения поглощаемого пленками PbTe излучения (квантовая эффективность $\eta=1$, коэффициенты поглощения $\alpha=6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ и отражения $R=60\%$). Эти расчеты подтверждаются измерениями фотопроводимости, если принять,

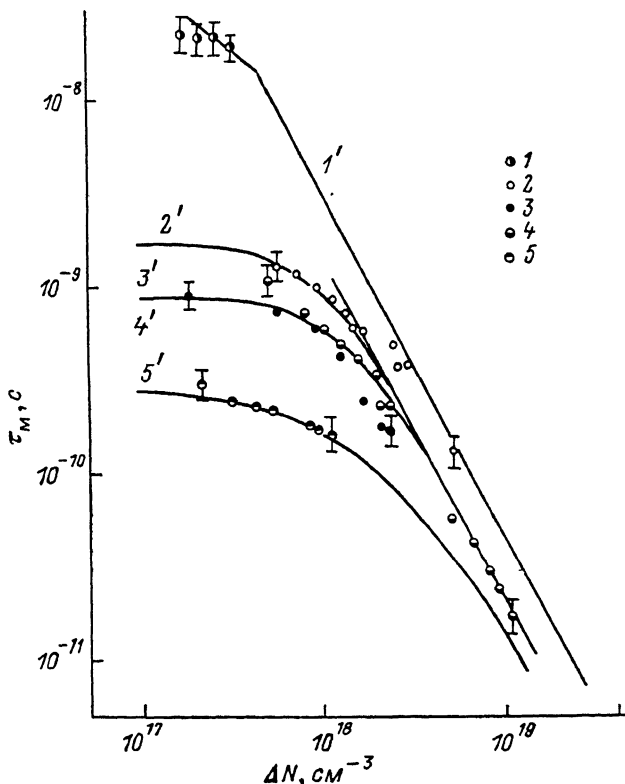


Рис. 2. Зависимость мгновенного времени релаксации фотопроводимости PbTe от концентрации неравновесных носителей заряда в свеженанесенных (2) и отожженных (3) пленках на слюде, в свеженанесенных (4) и отожженных (5) пленках на ситалле, в монокристалле (1). Сплошные линии — теоретическое вычисление по формуле (2). 1' — [16]; τ_R , нс: 2' — 1.7; 3', 4' — 0.9;

5' — 0.3; $\gamma_L N_S$, см²/с: 2'—4' — [0]; 5' — $2.2 \cdot 10^{-28}$; 2'—5' — $\gamma_A \approx 5 \cdot 10^{-28}$ см²/с.

что подвижность носителей близка к $20 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, т. е. примерно на 1.5 порядка меньше, чем для монокристалла [7]. Следует отметить, что оценки концентрации неравновесных носителей заряда в поликристаллических пленках свя-

заны с некоторыми погрешностями: с одной стороны, это погрешности при определении концентрации оптически генерированных носителей, а другой — неточность определения площади сечения генерирования тока, связанная с наличием неэффективных каналов проводимости, что приводит к снижению определяемой концентрации ННЗ. Результаты измерений показали, что при больших концентрациях ННЗ ($\Delta N \geq 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) доминирующей является нелинейная рекомбинация, не зависящая от типа подложки: неоднородной (ситалловой) или ориентирующей (слюдяной). Термообработка пленок также не влияет на тип рекомбинации при больших концентрациях фотоносителей. Примечательно, что из анализа впервые корреляционным методом измеренного фототоклика в пленках РbТе (на ситалле) полученные пикосекундные значения τ_m хорошо вписываются в продолжение прямой (рис. 2, кривая 4'), указывающей на механизм межзонной оже-рекомбинации.

При снижении концентрации фотоносителей в зависимости $\tau_m(\Delta N)$ отчетливо проявляются отклонения от вышеупомянутой прямой и переходы в зависимости, которые определяются линейной релаксацией. Эти отклонения, как показывают результаты, зависят от типа подложки и термообработки пленок. Наиболее медленная релаксация ($\tau_R = 1.7 \cdot 10^{-9} \text{ с}$) получена для пленок, напыленных на слюде (рис. 2, кривая 2'). В пленках с более выраженной поликристаллической структуры (на ситалле) время линейной релаксации сравнительно меньше ($\tau_R \approx 0.9 \cdot 10^{-9} \text{ с}$) (рис. 2, кривая 3'). Термоотжиг приводит к снижению времени линейной релаксации по сравнению со свежеприготовленными пленками на слюде до $\tau_R \approx 0.9 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ (кривая 3'), на ситалле — примерно до $\tau_R \approx 0.3 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. На основании структурных исследований образцов и данных по кинетике фотопроводимости получаем, что τ_R меньше для более мелкодисперсных пленок.

На основе результатов исследования структуры и фотопроводимости предлагаем следующую модель рекомбинации носителей заряда с учетом неоднородности пленок. При возбуждении неравновесных носителей в интервале исследуемых интенсивностей происходят экранирование и перезарядка областей пространственного заряда межкристаллических барьеров. Заполнение уровней рекомбинации поверхности достигает предела, когда скорость поверхностной рекомбинации становится равной $s = \gamma_n \gamma_p / (\gamma_n + \gamma_p) N_S$ [8]. Здесь γ_n и γ_p — коэффициенты захвата электронов и дырок поверхностными уровнями, а N_S — их плотность. Это подтверждается как близкой к гиперболической зависимостью времени релаксации малосигнальной фотопроводимости от концентрации носителей при более низких интенсивностях [9], так и почти независимыми в этом случае временами релаксации концентрации носителей (рис. 2, кривые 2'—5').

На рис. 2 показана также расчетная зависимость времени жизни носителей от их концентрации, когда учитываются межзонная излучательная и оже-рекомбинации согласно [10] (кривая 1'). Эти результаты близки к экспериментальным данным, полученным в [11] для монокристаллов и эпитаксиальных слоев; с ними совпадает и время жизни носителей в исходном монокристалле РbТе (точки 1). Из этих результатов следует, что коэффициент оже-рекомбинации в поликристаллах РbТе близок к $5 \cdot 10^{-28} \text{ см}^6/\text{с}$ (кривые 2'—5'), а процессами излучательной рекомбинации можно пренебречь. Поэтому при описании зависимости времени жизни носителей от их концентрации учитываются линейная, оже-рекомбинация через локальные уровни и межзонная оже-рекомбинация. Как следует из работы [12], в оже-рекомбинации с участием локальных уровней преобладает один тип носителей (предположим, что это электроны). Суммируя вышеизложенное, получаем следующую зависимость времени жизни носителей в поликристаллической пленке от концентрации неравновесных носителей заряда:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\gamma_n \gamma_p (1 + a \Delta N)}{\gamma_p + \gamma_n (1 + a \Delta N)} \frac{2N_S}{d} + \gamma_A \Delta N^2, \quad (1)$$

где a — коэффициент, определяющий относительный вклад оже-процесса с участием электронов при захвате носителей на поверхностный уровень, d — средний размер кристаллита, γ_A — коэффициент межзонной оже-рекомбинации в образце. Если $\gamma_n \ll \gamma_p$, то получим

$$1/\tau = 1/\tau_R + \gamma_L N_S \Delta N + \gamma_A \Delta N^2, \quad (2)$$

где введенные новые обозначения легко выводятся из предыдущей формулы. Важным является то, что возможны как прямой переход от линейной рекомбинации через уровни к межзонной оже-рекомбинации (кривые 2'—4'), так и выявление влияния оже-рекомбинации через локальные уровни (член $\gamma_L N_S \Delta N$). Последнее наиболее ярко проявляется на кривой 5'. Следовательно, термообработка поликристаллических пленок на ситалле включает в себя дополнительный механизм оже-рекомбинации через поверхностные уровни на границах кристаллитов.

Сопоставляя экспериментально полученное значение коэффициента межзонной оже-рекомбинации $\gamma_A = 5 \cdot 10^{-28}$ см⁶/с с теоретическим значением для монокристалла РbТе $\gamma_A \approx 2.3 \cdot 10^{-28}$ см⁶/с (найден с помощью данных расчета [9]), получаем, что для поликристаллических пленок РbТе γ_A в ~2 раза больше. Отметим, что в эпитаксиальных слоях экспериментально полученное значение $\gamma_A = 1.9 \cdot 10^{-28}$ см⁶/с [11] более близко к теоретическому для монокристалла.

Из представленных результатов следует, что коэффициент межзонной оже-рекомбинации в монокристалле меньше, чем в микрокристаллитах. Это, видимо, связано с тем, что микродеформации и дефекты в микрокристаллитах деформируют спектр многодолинного кристалла РbТе, облегчая соблюдение условий для оже-взаимодействия.

Авторы выражают благодарность Р. Ринкунасу за проведение электронно-микроскопического анализа пленок.

Список литературы

- [1] Волков Б. А., Панкратов О. А. // ЖЭТФ. 1985. Т. 88. В. 1. С. 280—292.
- [2] Неустроев Л. Н., Осипов В. В. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 1. С. 59—65. 1986. Т. 20. В. 1. С. 66—72.
- [3] Неустроев Л. Н., Осипов В. В. // Микроэлектрон. 1988. Т. 17. В. 5. С. 399—416.
- [4] Johnson A. M., Kisker D. W., Simpson W. M., Feldman R. D. // Picosecond electronics and Proc. of the topical Meeting optoelectronics. Nevada, 1985. P. 188—192.
- [5] Vaitkus J., Tomašiūnas R., Kutra J., Petrauskas M., Rinkūnas R., Žindulis A. // Abstr. IV Int. Conf. II—VI Comp. Berlin (West), 1989. P. TU-4-3.
- [6] Lee C. H. Picosecond optoelectronics devices. N. Y., 1984. 400 p.
- [7] Равич Ю. И., Ефимова Б. А., Смирнов И. А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца РbТе, РbSe, РbS. М., 1968. 382 с.
- [8] Dousmanis G. C. // J. Appl. Phys. 1959. V. 30. N 2. P. 180—184.
- [9] Микалкявичюс М., Тумкявичюс К. // Тр. Всес. конф. по физике и технологии тонких пленок. Ивано-Франковск, 1984. С. 196.
- [10] Hoai T. H., Herman K. H. // Phys. St. Sol. (b). 1977. V. 83. P. 465.
- [11] Herman K. H. // Sol. St. Electron. 1978. V. 21. P. 1487—1491.
- [12] Landsberg P. T., Rhys-Roberts C., Lal P. // Proc. Int. Conf. Phys. Semicond. Paris, 1964. P. 803—809.

Вильнюсский университет

Получена 31.01.1990
Принята к печати 18.06.1990