

погрешности измерений не обнаружено. Такое поведение  $V_H(P)$  качественно согласуется с зависимостью  $V_T(P)$ , полученной в экспериментах по динамике дислокаций в гидростатически сжатых щелочно-галлоидных кристаллах [9]. Только в кристаллах KCl и KBr в тех опытах было получено аномально большое изменение скорости дислокаций с ростом давления. Этот факт не нашел в то время своего объяснения в рамках модели, предполагающей усиление упругого взаимодействия дислокаций с точечными дефектами.

Сопоставляя результаты настоящей работы с данными других исследований [6-9], можно с достаточными основаниями предположить, что пластические свойства фазы низкого давления связаны с упругими характеристиками фазы высокого давления. Этот эффект должен быть сильнее выражен в кристаллических твердых телах, имеющих сравнительно невысокое давление полиморфного фазового перехода.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Боярская Ю. С., Грабко Д. З., Кац М. С. Физика процессов микроиндентирования. Кишинев, 1986. 293 с.
- [2] Концевой Ю. А., Литвинов Ю. М., Фаттахов Э. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М., 1982. 239 с.
- [3] Livshits L. D., Fomichev T. D. // Physica Status Solidi (a). 1979. V. 54. N 2. P. K123-K127.
- [4] Григорьев О. Н., Мильман Ю. В., Трефилов В. И. // Элементарные процессы пластической деформации кристаллов. Киев, 1978. С. 144-159.
- [5] Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций: Пер. с англ. М., 1972. 599 с.
- [6] Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник / Под ред. И. Н. Францевича. Киев, 1982. 286 с.
- [7] Бланк В. Д., Веллер М. В., Коняев Ю. С., Кульницкий Б. А., Эстрин Э. И. // Влияние высоких давлений на свойства материалов. Киев, 1983. С. 44-47.
- [8] Gridneva I. V., Milman Yu. V., Trefilov V. I. // Physica Status Solidi (a). 1972. V. 14. N 1. P. 177-182.
- [9] Барбашов В. И., Стрельцов В. А., Ткаченко Ю. Б. // ФТТ. 1982. Т. 24. № 4. С. 1187-1192.

Донецкий

физико-технический институт

Поступило в Редакцию

3 апреля 1991 г.

УДК 537.312.7 621.315.292

© Физика твердого тела, том 33, № 9, 1991

Solid State Physics, vol. 33, N 9, 1991

## ПРОЦЕССЫ РЕКОМБИНАЦИИ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ-СУЛЬФИД САМАРИЯ

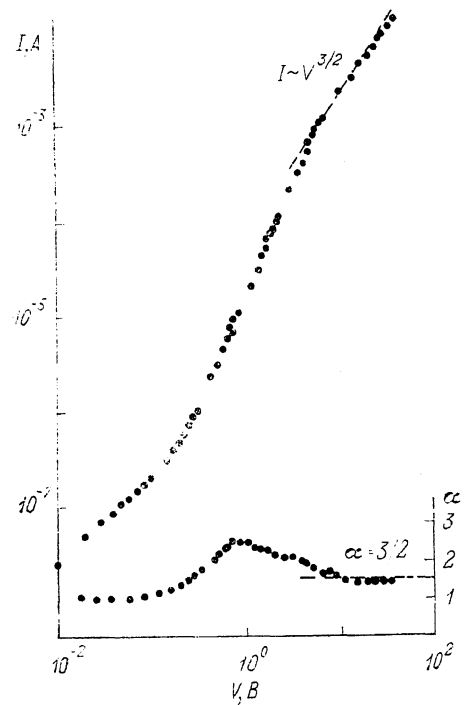
Н. М. Володин, Е. А. Серова, П. С. Смертенко, А. В. Ханова

На основе исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур Me—моносольфид самария впервые определены рекомбинационные параметры центров запрещенной зоны. Показано, что в данных структурах при комнатной температуре реализуется режим двойной инжекции носителей.

Исследование свойств поликристаллических пленок сульфида самария в последние годы вызвано их высокой тензочувствительностью [1]. Изучение электропроводности и механизмов изменения сопротивления при деформации [2-4] показало, что пьезорезистивный эффект в моносольфиде самария носит концентрационный характер. При этом были обнаружены мелкие донорные уровни с энергией активации порядка 0.045 эВ и концентрацией порядка  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>, а также уровень, образованный 4f<sup>6</sup>-оболоч-

кой понов  $\text{Sm}^{2+}$ , глубиной 0.23 эВ. Вместе с тем не были исследованы процессы рекомбинации носителей тока на этих уровнях, не были определены коэффициент захвата носителей на уровень, время жизни неосновных носителей тока на нем, хотя они оказывают существенное влияние на электропроводность.

В данной работе исследования проводились новыми методами физической диагностики полупроводниковых материалов и структур, основанными на теории инжекционно-контактных явлений в полупроводниках [5, 6]. Эти методы позволяют на основе дифференциального анализа измеряемой ВАХ получать важнейшие параметры полупроводника и контактов к нему, таких как глубина и концентрация уровней в запрещенной зоне, время жизни неосновных носителей тока, высота и ширина приконтактного барьера, скорость поверхностной рекомбинации и др., а также разграничивать режимы монополярной и двойной инжекции, барьерной электропроводности и полевой ионизации уровней в запрещенной зоне полупроводника.



Вольт-амперная характеристика структуры Bi—SmS. Образец № 138.

представляет собой отношение плотности объемного заряда к концентрации носителей, определенных по точке максимума степени ВАХ, и является по сути эффективным коэффициентом прилипания. Для монополярной инжекции  $Q_m \gg 1$ , для двойной  $Q_m \ll 1$ .

Для низкоомного моносulfида самария преимущественно реализуется режим двойной инжекции носителей тока, поэтому конкретизация параметров проводилась на базе модели с рекомбинационным и глубоким уровнем и мелкими донорами, которые могут принимать участие в бимолекулярной рекомбинации. Численный счет на ЭВМ для режима значительной инжекции носителей, когда приконтактная концентрация носителей  $n_k$  значительно превосходит  $n_m$  [5, 7], позволяет определить рекомбинационные параметры локальных центров:  $\tau_{gr}$  — время жизни неосновных носителей относительно рекомбинационного  $r$ -центра,  $E_r$  — глубину  $r$ -центра,  $\gamma$  — коэффициент рекомбинации на более мелкие центры [5-7].

Исследование рекомбинационных процессов проводилось на поликристаллических пленках моносulfида самария, полученных в вакууме с металлическими контактами: Cu, In, Bi, Fe, Sn.

Толщина пленок  $1 \cdot 10^{-4}$  см, а межэлектродное расстояние  $5 \cdot 10^{-3}$  см. ВАХ измерялись на автоматизированном комплексе «ИНЕЙ», состоящем

Дифференциальный анализ ВАХ основан на выявлении тонкой структуры кривой (с помощью ее обработки) в виде зависимости от приложенного напряжения ее дифференциального наклона в двойном логарифмическом масштабе (степень ВАХ). Такая обработка позволяет легко отыскать точки перегиба на сверхлинейной и сублинейной ВАХ (максимум и минимум степени ВАХ соответственно), ее асимптотики (постоянные значения степени ВАХ). По значениям степени в области скачка  $\alpha_m$ , напряжению  $V_m$  и току  $I_m$  в данной точке определяют концентрацию носителей  $n_m$  и объемный заряд ( $\rho_m/e$ ).

Для идентификации режима токопрохождения вводится коэффициент дискриминации (или коэффициент разграничения)  $Q^i_m = \rho_m / en_m$ , который

из тестера контроля статических параметров транзисторов 14 ТКС 100 и микро-ЭВМ «Электроника-60» [8]. Типичная ВАХ для образца № 138 представлена на рисунке. Здесь же показана зависимость от приложенного напряжения дифференциального наклона ВАХ в двойном логарифмическом масштабе  $\alpha = d \lg I / d \lg V$ . ВАХ исследованных структур были линейны до напряжений порядка 0.1 В. При увеличении напряжения ток увеличивался сверхлинейно для всех металлов, кроме меди, для которой ВАХ была сублинейной. Наблюдались два вида характеристик. Для одного характерно наличие максимума степени в переходом к диапазону, где ток пропорционален приложенному напряжению в степени 1.5 или 2. Для второго наблюдается постепенный переход от омической зависимости к зависимости с  $\alpha = 1.5, 2$  без скачка тока.

Проведенный расчет для различных образцов (см. таблицу) показал, что во всех случаях  $Q_m = (10^{-8} - 10^{-4}) \ll 1$ , т. е. имеет место режим двойной инжекции носителей тока. Об этом свидетельствует и наличие характерных для двойной инжекции участков ВАХ с  $\alpha = 1.5$  и  $\alpha = 2$ . Тогда, согласно [5-7], в предположении моноэнергетического уровня можно определить значения  $\tau_{pr}$ ,  $E_r$ ,  $\gamma$ . Полученные результаты по группе образцов сведены в таблице.

Параметры структуры Me—SmS, определенные по ВАХ

Номер образца	$Q_m$	$\tau_{pr}$ , с	$E_r$ , эВ	$\gamma$ , см <sup>3</sup> · с <sup>-1</sup>
102	$4.16 \cdot 10^{-8}$	$1.40 \cdot 10^{-8}$	$0.16 \pm 0.01$	$3.05 \cdot 10^{-13}$
104	$9.28 \cdot 10^{-5}$	$2.02 \cdot 10^{-6}$	$0.22 \pm 0.01$	$6.86 \cdot 10^{-11}$
138	$3.56 \cdot 10^{-8}$	$5.35 \cdot 10^{-4}$	$0.18 \pm 0.01$	$2.77 \cdot 10^{-13}$
140	$1.25 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-6}$	$0.24 \pm 0.01$	$1.92 \cdot 10^{-11}$
124	$3.61 \cdot 10^{-6}$	$3.61 \cdot 10^{-6}$	$0.19 \pm 0.01$	—

При расчете использованы следующие константы сульфида самария: эффективная масса электронов  $m_n = 0.78$ , диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 10$ , подвижность электронов  $\mu_n = 100$  см<sup>2</sup>/В · с, подвижность дырок  $\mu_p = 10$  см<sup>2</sup>/В · с. Обнаружены два уровня в запрещенной зоне сульфида самария, один из них с точностью до термического потенциала  $kT = 0.0259$  эВ совпадает с известным уровнем в сульфиде самария  $E = 0.23$  эВ [3]. Значения коэффициента рекомбинации на более мелкие центры для уровня 0.17 эВ приближаются к коэффициенту зона-зонной рекомбинации, равному  $2 \cdot 10^{-14}$  см<sup>3</sup> · с<sup>-1</sup> [5]. Значения  $\gamma \approx 10^{-11}$  см<sup>3</sup> · с<sup>-1</sup> для уровня с глубиной 0.23 эВ свидетельствуют об участии в рекомбинации и ближе расположенных к *c*- и *v*-зонам *t*- и *s*-состояний. Наблюдаемые участки  $\alpha = 2$  характерны для мономолекулярной рекомбинации носителей тока, тогда как при  $\alpha = 1.5$  имеет место бимолекулярная рекомбинация [5, 9].

Таким образом, исследование ВАХ поликристаллических пленок моносульфида самария позволило впервые определить рекомбинационные параметры центров запрещенной зоны.

#### Список литературы

- [1] Смирнов И. А., Оскотский В. С. // УФН. 1978. Т. 124. № 2. С. 241—279.
- [2] Morillo J., Konozynovski M., Senateur J. P. // Sol. St. Commun. 1980. V. 35. P. 931—936.
- [3] Виноградов А. А., Гребенский С. И., Каминский В. В., Степанов Н. Н., Сергеева В. М., Смирнов И. А. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 2. С. 402—408.
- [4] Каминский В. В., Виноградов А. А., Володин Н. М., Романова М. В., Сосова Г. А. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 9. С. 153—157.
- [5] Зюганов А. Н., Свечников С. В. Инжекционно-контактные явления в полупроводниках. Киев: Наукова думка, 1981. 256 с.
- [6] Зюганов А. Н., Корень Н. Н., Смертенко П. С. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 3. С. 617—622.

- [7] Дякин В. В., Зюганов А. Н., Смертенко П. С., Хилимова Н. С. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. 1987. № 11. С. 48—55.  
[8] Гусев М. Ю., Елисеева Т. П., Зюганов А. Н., Иванов А. М., Смертенко П. С., Таиров С. М. // Электронная промышленность. 1988. № 8.  
[9] Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: ИЛ, 1973. 416 с.

Институт полупроводников АН Украины  
Киев

Поступило в Редакцию  
3 апреля 1991 г.

УДК 538.958

© Физика твердого тела, том 33, № 9, 1991

Solid State Physics, vol. 33, N 9, 1991

## ПОЛУЧЕНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАМЕЩЕННОГО ПОЛИДИАЦЕТИЛЕНА

*Н. В. Агринская, Е. Г. Гук, Е. А. Дрыгайлова, Л. А. Ремизова,  
В. М. Тучкевич*

Для целей сверхбыстрого нелинейно-оптического преобразования сигналов необходимы материалы с очень малыми временами отклика и с показателем преломления, зависящим от интенсивности света (с большой величиной нелинейной оптической восприимчивости 3-го порядка  $\chi^{(3)}$ ) [1]. Кроме того, материал должен быть достаточно пластичным для изготовления оптических устройств (интерферометров, волноводов). Класс сопряженных полимеров с делокализованной системой  $\pi$ -электронов обладает в этом смысле уникальными свойствами. Известно, что значение  $\chi^{(3)}$  возрастает с увеличением длины делокализации  $L$ ; так,  $\chi^{(3)}$  в полимерном материале на 2—3 порядка больше, чем в соответствующем мономере с малым значением  $L$ . Времена релаксации возбуждений в таких системах определяются чисто электронными процессами и достигают значений 1—0.3 пс. При этом величина  $\chi^{(3)}$  в области нерезонансных переходов достигает значений  $10^{-10}$ — $10^{-12}$  эл. ст. ед., что значительно больше соответствующих величин  $\chi^3$  в неорганических полупроводниках. Большое число экспериментальных данных имеется в настоящее время для группы сопряженных полимеров — полидиациетиленов [2]. Однако для применения этих материалов в оптоэлектронике необходимо изготовление тонкопленочных монокристаллов нужной формы с хорошим оптическим качеством. Это является достаточно трудоемкой задачей, в настоящее время ее удастся решить лишь для нескольких замещенных полидиациетиленов. Отметим, что класс полидиациетиленов очень велик, их растворимость, структурные и оптические свойства зависят от типа присоединенных к основному углеродному скелету заместителей —  $R(R-C\equiv C-C\equiv C-R)$  и от условий полимеризации.

В настоящей работе описан способ получения одного из замещенных полидиациетиленов — поли(1.6-диморфолино—2.4-гексадина) — ПДА ДМ и впервые исследованы его линейные и нелинейные оптические свойства. Исходный мономер диациетилена (1.6-диморфолино—2.4-гексадин) был получен методом окислительной димеризации из препаратил морфолина [3]. Вначале была сделана попытка нанесения полученного мономера на подложку методами вакуумного распыления или осаждения из раствора. После полимеризации в УФ и прогрева при 90 °С в течение нескольких часов были получены окрашенные полимерные пленки, однако они оказались недостаточно однородными для изучения оптических характеристик. Для получения оптических однородных пленок иногда используются композиты на основе оптически прозрачной матрицы полиметилметакрилата (ПММА) и полимера [4]. Полученный нами полимер — полидиациетилен — диморфолин (ПДА—ДМ) нерастворим, и получение указанного