

- [1] Барышев Н. С., Гельмонт Б. Л., Ибрагимова М. И. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 2. С. 209—224.
- [2] Любченко А. В., Салько Е. А., Сизов Ф. Ф. Физические аспекты полупроводниковой инфракрасной фотозлектроники. Киев, 1984.
- [3] Иванов-Омский В. И., Огородников В. К., Тотиева Т. Ц. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 4. С. 699—702.
- [4] Chen M. C. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 2. P. 945—946.
- [5] Cummings K. D., Perton S. J., Vella-Coliero G. P. // J. Appl. Phys. V. 60. N 1. P. 1676—1680.
- [6] Kunst M., Beck G. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 6. P. 3558—3566.
- [7] Баженов Н. М., Гельмонт Б. Л., Иванов-Омский В. И., Малькова А. А., Огородников В. К., Тотиева Т. Ц. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 1. С. 101—114.

Московский инженерно-физический институт

Получено 27.05.1991
Принято к печати 24.07.1991

ФТП, том 26, вып. 1, 1992

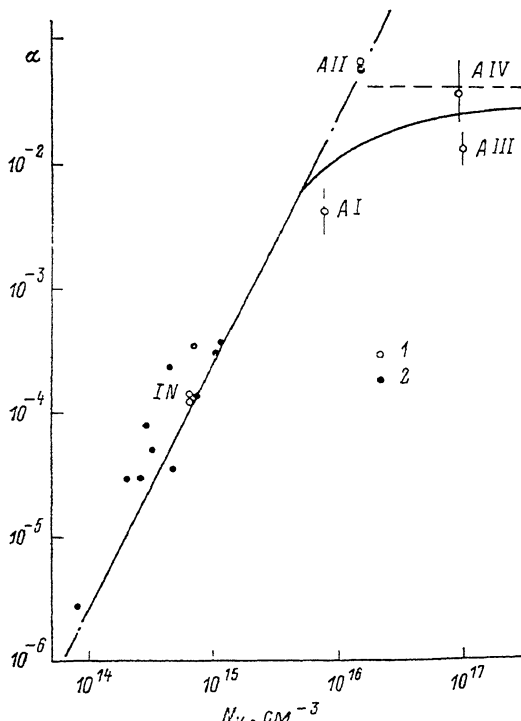
ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО ОТЖИГА НА ШУМ $1/f$ В $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Бакши И. С., Карачевцева Л. А., Любченко А. В.,
Петряков В. А., Сальков Е. А., Хижняк Б. И.

В настоящее время шум $1/f$ в полупроводниках связывается с флуктуациями числа подвижных носителей заряда за счет их захвата на некоторые центры, природа которых пока не ясна [1, 2]. Неясно также, в чем принципиальное отличие центров, приводящих к шуму $1/f$, от обычных, создающих генерационно-рекомбинационный (g - r) шум. Отличие должно быть, так как шум $1/f$ не объясняется простой суперпозицией g - r компонент [3]. Мы предлагаем попытку решения этого вопроса на примере материала $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, применяемого в ИК фотозлектронике. Согласно нашим предварительным данным, шум $1/f$ в n - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ обусловлен флуктуациями числа электронов [4], а его интенсивность растет с концентрацией акцепторов, предположительно, вакансий ртути [5]. В данной работе за счет контролируемого введения вакансий ртути исследованный диапазон концентраций акцепторов существенно расширен — вплоть до конверсии материала из n -типа в p -тип.

Образец	Температура отжига, К	Толщина, мкм (± 2 мкм)	Тип носителей	Концентрация, см^{-3}	Подвижность, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
IV	—	30	n	$2.4 \cdot 10^{15}$	$1.6 \cdot 10^5$
AI	623	38	n	$6.4 \cdot 10^{13}$	$9.8 \cdot 10^4$
AII	703	29	p	$3.9 \cdot 10^{15}$	310
			n	$5.4 \cdot 10^{12}$	$7.3 \cdot 10^4$
AIII	783	26	p	$1.3 \cdot 10^{16}$	680
			n	$9.4 \cdot 10^{14}$	540
AIV	783	37	p	$8.4 \cdot 10^{14}$	560

Образцы изготовлены из близко расположенных участков одного монокристалла n - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенного методом вертикально направленной кристаллизации. Заготовки с близкими параметрами [$x=0.205 \div 0.213$, концентрация



Уровень шума $1/f$ в зависимости от концентрации вакансий Hg для образцов из данной работы (1) работы [5] (2).

Для образцов IN и AII приведены те значения параметра α , которые воспроизводились на различных участках одного образца. Для остальных образцов представлены средние значения α в границе наблюдаемого разброса. Штрихпунктирная линия соответствует закону $\alpha \propto N_V^2$. Штриховой линией показана оценка уровня шума при пуассоновском распределении порождающих шум флуктуаций числа носителей.

электронов и холловская подвижность при 77 К соответственно $n = (1.7 \div 2.0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\mu = (2.1 \div 2.5) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, полученные после отжига в насыщенных парах ртути, повторно отжигались (кроме одной, оставленной в качестве контрольной) в той же атмосфере при повышенных температурах в течение времени, достаточного для гомогенизации. Образцы в форме полосок $0.25 \times 5 \text{ мм}$ с отводами для холловских и шумовых измерений изготовлены аналогично [4-7]. Измерения проведены при 85 К. В таблице представлены

значения толщины образцов, температура второго отжига и холловские параметры. В случае смешанной проводимости (образцы AI и AII) вклады электронов и дырок разделены аппроксимацией на ЭВМ зависимостей коэффициента Холла от магнитной индукции. Как и следовало ожидать (см., например, [8]), при увеличении температуры отжига концентрация вакансий ртути возрастает, что фиксируется по увеличению дырочной компоненты эффекта Холла и электропроводности.

В образце IN концентрацию доноров N_D и вакансий ртути N_V оценили аналогично [5] по подвижности электронов с использованием расчетов [9]. Полученное значение $N_D \approx 3.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ считали справедливым для всех образцов в силу близости их исходных параметров. Концентрацию вакансии ртути в отожженных образцах оценили из уравнения электронейтральности $n + N_V = p + N_D$. Здесь учтено, что в материале p -типа при 85 К вакансии ионизированы в основном однократно [10].

Избыточный шум измерен по стандартной 3- и 4-х зондовой методике в диапазоне частот 2-20 кГц анализатором спектра СК4-72. Его спектральная плотность $S_p(f)$ квадратично зависела от протекающего тока и во всем исследованном диапазоне частот изменялась с частотой по закону $1/f^\beta$. Значения β для различных образцов лежали в пределах $0.78 \div 1.02$. Уровень шума характеризовали параметром $\alpha = [S_p(f) \Omega n_m f / V^2]_{f=30 \text{ Гц}}$, где V — постоянное напряжение на измеряемой части образца, Ω — ее объем, n_m — концентрация основных носителей. На рисунке параметр α представлен в виде функции от концентрации вакансий ртути. Здесь же приведены для сравнения данные [5] для n -типа образцов. Видно, что уровень шума в исходном образце (IN) типичен для данного материала. При увеличении концентрации N_V параметр α возрастает примерно по закону $\propto N_V^{1/2}$, предложенному в [6], а затем имеет тенденцию к выходу на плато.

Отметим, что в наших образцах p -типа (так же как и n -типа [4, 5]) поверхность не дает определяющего вклада в шум $1/f$. Так, из двух аналогичных

образцов АIII и АIV более тонкий АIII характеризуется меньшими значениями параметра α .

Исходя из гипотезы о возникновении шума $1/f$ из-за флуктуаций количества носителей, можно ожидать, по аналогии с г-р шумом (см., например, [11]), что интенсивность шума $1/f$ должна возрастать пропорционально концентрации N_i активных ловушечных центров, если N_i существенно меньше концентрации носителей. При выполнении противоположного неравенства дисперсия шума должна определяться не числом ловушек, а средним числом носителей. Принимая, что дисперсия числа носителей равна их среднему (распределение Пуассона), и считая, что шум $1/f$ сосредоточен в области частот (f_1, f_2) , для параметра α из формулы Хоге [12] получаем оценку $\alpha = 1/\ln(f_2/f_1)$. От протяженности спектра $1/f$ это выражение зависит слабо и для, например, $f_2/f_1 = 10^{10}$ дает $\alpha \sim 4 \cdot 10^{-2}$. Данная оценка не использует параметров материала и является общей для случая высокой концентрации центров, ответственных за шум $1/f$. По порядку величины эта оценка описывает полученные данные в области насыщения кривой (см. рисунок).

Экспериментальные точки для образцов АI и АIII (p -типа) лежат примерно на одной прямой с точками, соответствующими n -типу образцов. Это позволяет предположить, что центры, модулирующие число носителей в обоих типах материала, одинаковы, и их активность не зависит от положения уровня Ферми. Это в свою очередь возможно, если структура центров нестабильна во времени — например, если реконфигурация образующих центр ионов приводит к перемещению энергетического положения центра через уровень Ферми, вынуждая центр отдать или захватить электрон. Таким образом, мы предполагаем, что центры, отвечающие за возникновение шумов г-р и $1/f$, отличаются прежде всего тем, что первые из них стабильны во времени, а вторые нет. Память обеспечивается метастабильной природой центров, а захват или эмиссия носителя происходит относительно быстро. (Например, в исходном монокристалле время жизни электронов составляет, согласно нашим измерениям, 0.8—2 мкс).

Зависимость уровня шума $1/f$ от концентрации вакансий ртути на начальном участке близка к квадратичной. Поэтому логично предположить, что центры, отвечающие за шум $1/f$, возникают из-за взаимодействия вакансий и, возможно, представляют собой бивакансии или комплексы (бивакансия—донорная примесь) и т. п. Тогда перемещение вакансий в близлежащий узел в поле соседнего иона обеспечит требуемое смещение ловушечного уровня относительно уровня Ферми.

Согласно одной из гипотез, происхождение шума $1/f$ связано с деградационными процессами [13], а его интенсивность несет информацию о надежности приборов (см., например, [14]). Основным фактором, определяющим долговременную стабильность $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, является потеря летучего компонента — ртути [15]. Существование зависимости уровня шума $1/f$ от концентрации вакансий ртути показывает, что шумовые методы могут быть использованы не только для выявления протяженных дефектов структуры в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [6, 7], но перспективны также для прогнозирования надежности приборов на основе этого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Коган Ш. М. // УФН. 1985. Т. 145. В. 2. С. 285—328.
- [2] Weissman M. B. // Rev. Mod. Phys. 1988. V. 60. N 2. P. 537—571.
- [3] Lee K., Amberiadis K., van der Ziel A. // Sol. St. Electron. 1982. V. 25. N 10. P. 999—1002.
- [4] Бахши И. С., Кодалашвили М. З., Сальков Е. А., Хижняк Б. И. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 12. С. 2182—2186.
- [5] Бахши И. С., Гринь В. Ф., Карачевцева Л. А., Кодалашвили Т. З., Сальков Е. А., Хижняк Б. И. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 571—573.
- [6] Bakshee I. S., Karachevtseva L. A., Lyubchenko A. V. et al. // Phys. St. Sol. 1990. V. A117. N 1. P. K37—K41.

- [7] Bakshee I. S., Lyubchenko A. V., Salkov E. A., Khizhnyak B. I. // Sol. St. Electron. 1990. V. 33. N 12. P. 1653—1654.
- [8] Jones C. L., Quelch M. J. T., Capper P., Gosney J. J. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 12. P. 9080—9092.
- [9] Гороховский И. Р., Лауринвичюс А. К., Пожела Ю. К. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 11. С. 1998—2001.
- [10] Gold M. C., Nelson D. A. // J. Vac. Sci. Techn. 1986. V. A4. N 4. P. 2040—2047.
- [11] Ван-дер-Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках. М., 1961. 232 с.
- [12] Hooge F. N., Kleinpenning T. G. M., Vandamme L. K. J. // Rep. Progr. Phys. 1981. V. 44. N 5. P. 479—532.
- [13] Малахов А. Н., Якимов А. В. // Радиотехн. и электрон. 1974. Т. 19. В. 11. С. 2436—2438.
- [14] Пряников В. С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. М., 1978. 112 с.
- [15] Dornhaus R., Nimitz G. // Narrow-gap Semiconductors. Berlin, 1985. P. 119—309.

Институт полупроводников
АН Украины
Киев

Получено 30.05.1991
Принято к печати 24. 07. 1991

ФТП, том 26, вып. 1, 1992

РЕКОМБИНАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ТЕРМООБРАБОТАННОМ Si С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ РОСТОВЫХ МИКРОДЕФЕКТОВ

Колковский И. И., Латышенко В. Ф., Лугаков П. Ф., Шуша В. В.

При выращивании бездислокационных кристаллов кремния в их объеме, как правило, формируются ростовые микродефекты $[1^{3-}]$. Сведения об их влиянии на процессы рекомбинации носителей заряда крайне ограничены $[3^{7}]$. Это и определило цель данной работы, в которой изучалось изменение рекомбинационных характеристик бездислокационных кристаллов с различными типами микродефектов при термообработках (ТО) в диапазоне температур $100\div 600$ °С.

Исследовался кремний *n*-типа с удельным сопротивлением ~ 100 Ом·см. Образцы размерами $1.5 \times 2 \times 13$ мм были вырезаны из одного слитка диаметром 28 мм, который выращивался методом бестигельной зонной плавки в вакууме с переменной скоростью v_p и содержал в силу этого различные типы микродефектов. Их концентрация и характер распределения по пластине определялись металлографическим методом после селективного травления поверхности $[2]$. При $v_p = 1$ мм/мин формировались крупные (≥ 20 мкм) микродефекты *A*-типа в концентрации $N_A = 10^4$ см $^{-3}$. Если $v_p = 3$ мм/мин, то по пластине выявлялось неоднократное (в виде свирл-картины) распределение менее крупных (1—5 мкм) микродефектов *A*-, а также *B*-типов (0.1—0.3 мкм), концентрации которых были $N_A = 10^5$ и $N_B = 10^6$ см $^{-3}$. Увеличение скорости роста до $v_p = 6$ мм/мин приводило к появлению равномерно распределенных сравнительно мелких (0.01 мкм) микродефектов *D*-типа ($N_D = 10^{12}$ см $^{-3}$). Для краткости изложения образцы с микродефектами *A*-, *A+B*- и *D*-типов будем обозначать как Si (*A*), Si (*A, B*) и Si (*D*). Исследуемые кристаллы, содержащие по данным ИК поглощения примеси кислорода и углерода в концентрации $(2\text{—}3) \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, подвергались последовательной 15-минутной термообработке с шагом 25 °С в интервале температур $100\div 600$ °С. После ТО образцы медленно охлаждались