

07

## Исследование индуцированной фото-термопроводимости в гетеропереходах $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-Mn}_4\text{Si}_7$ и $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-M}$

© Т.С. Камилов,<sup>1</sup> В.В. Клечковская,<sup>2</sup> Б.З. Шарипов,<sup>1</sup> А. Тураев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет,  
700095 Ташкент, Узбекистан  
e-mail: tulkyn@mail.ru

<sup>2</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН,  
119333 Москва, Россия  
e-mail: klechvv@ns.crys.ras.ru

(Поступило в Редакцию 21 марта 2012 г.)

Исследована кинетика протекания фототока при „собственном“ освещении с  $h\nu \geq 1.12\text{ eV}$  в гетеропереходах  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-M}$  при высоких приложенных напряжениях. Установлено, что протекаемый фототок, рассеиваемая мощность и температура на обратносмещенном контакте гетероперехода при постоянно приложенном напряжении, низких температурах и освещении гетеропереходов с  $h\nu \geq 1.12\text{ eV}$  являются функцией времени. На основе анализа температурных зависимостей величины и формы нарастания фототока во времени показано, что импульсы фототока состоят из двух участков: первый соответствует медленно нарастающему малому значению тока с крутизной  $\sim (2-4) \cdot 10^{-4}\text{ A/s}$ , а второй участок характеризуется резким нарастанием тока с крутизной  $\sim 0.1-1\text{ A/s}$ . По значениям крутизны оценены скорости нагрева  $\beta_1 = 42\text{ deg/s}$  и  $\beta_2 = 3 \cdot 10^3\text{ deg/s}$  и величины градиентов температур на переходном слое, соответствующем границе раздела между  $\text{Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$   $\Delta T/\Delta x = 6.3 \cdot 10^6\text{ K/cm}$  для  $\beta_1$  и  $\Delta T/\Delta x \geq 1.5 \cdot 10^8\text{ K/cm}$  для  $\beta_2$ . Показано, что джоулевым самонагревом можно достигать больших скоростей нагрева в обратносмещенном контакте гетеропереходов, что обеспечивает быстрое нагревание, подобное прямоугольной ступени возбуждения, которое эквивалентно включению длинноволнового (примесного) освещения.

### Введение

Ранее нами были исследованы фото-вольт-амперные характеристики (ФВАХ) гетеропереходов  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-M}$  и установлена природа протекания фототока в процессе освещения с  $h\nu \geq E_g$  [1–3], проанализирована роль контакта  $\text{Mn}_4\text{Si}_7$  в образовании высокой фоточувствительности при освещении базы диодов с  $h\nu \geq 1.12\text{ eV}$  при низких температурах (77–220 К). На основе ФВАХ-диодов была построена структура энергетических зон в состоянии прохождения фототока. В работе [3] установлен механизм насыщения фототока и возникновения отрицательной дифференциальной фотопроводимости в этих гетеропереходах.

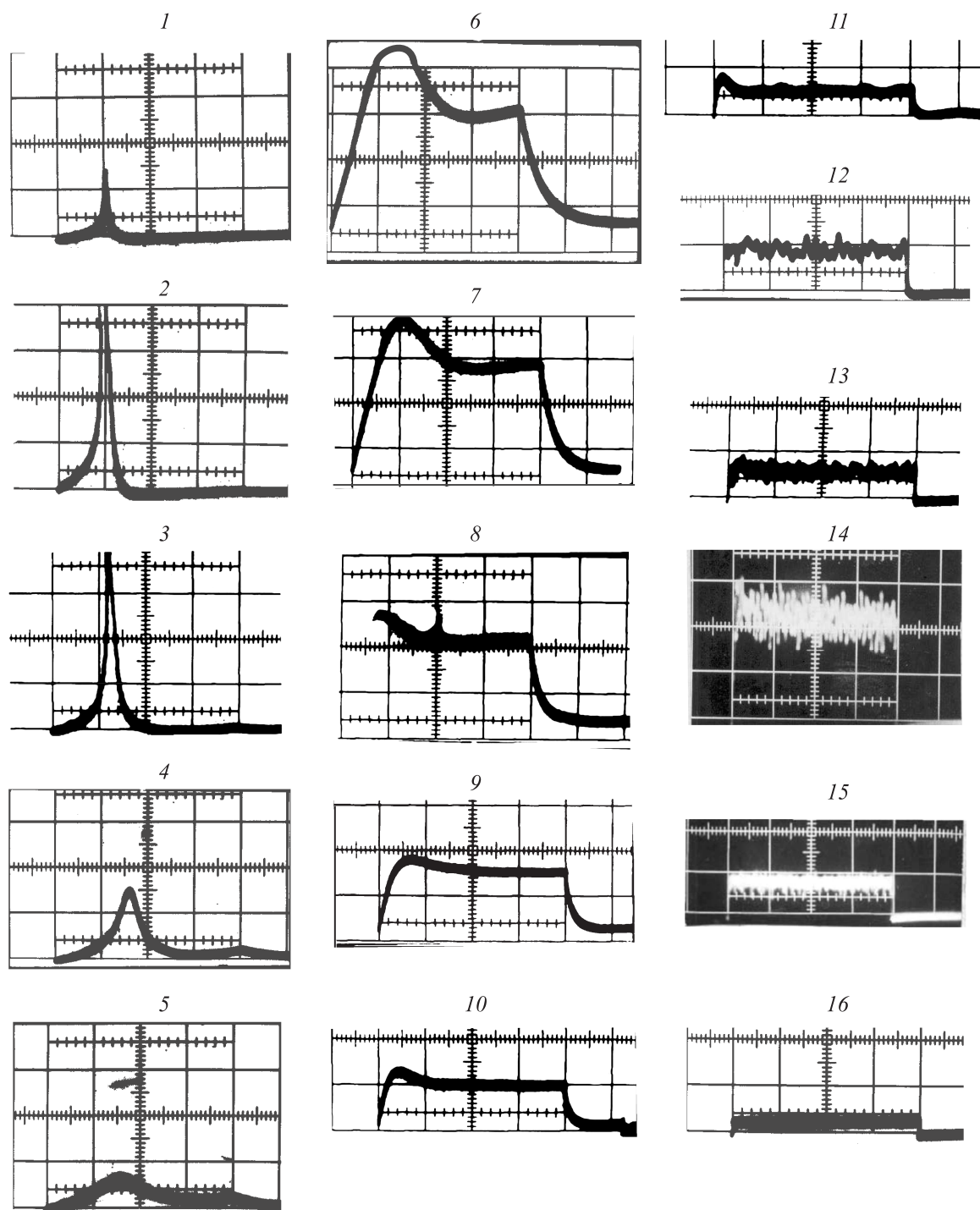
Настоящая работа является продолжением предыдущих исследований и ее целью является установление природы индуцированной фото-термопроводимости в гетеропереходах  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-M}$ .

### Экспериментальные результаты

Исследуемые гетеропереходы и методика проведения экспериментов аналогичны описанным в работе [3]. В настоящей работе исследуется температурная зависимость термического возбуждения прилипших электронов на донорных уровнях марганца в результате

предварительного „собственного“ освещения базовой области гетероперехода с  $h\nu \geq 1.12\text{ eV}$ . Термическое возбуждение прилипших электронов на уровнях Mn в базовой области гетероперехода, в соответствии с данными [4], должно привести к явлению „индуцированной термопроводимости“ (по аналогии с индуцированной фотопроводимостью [3]).

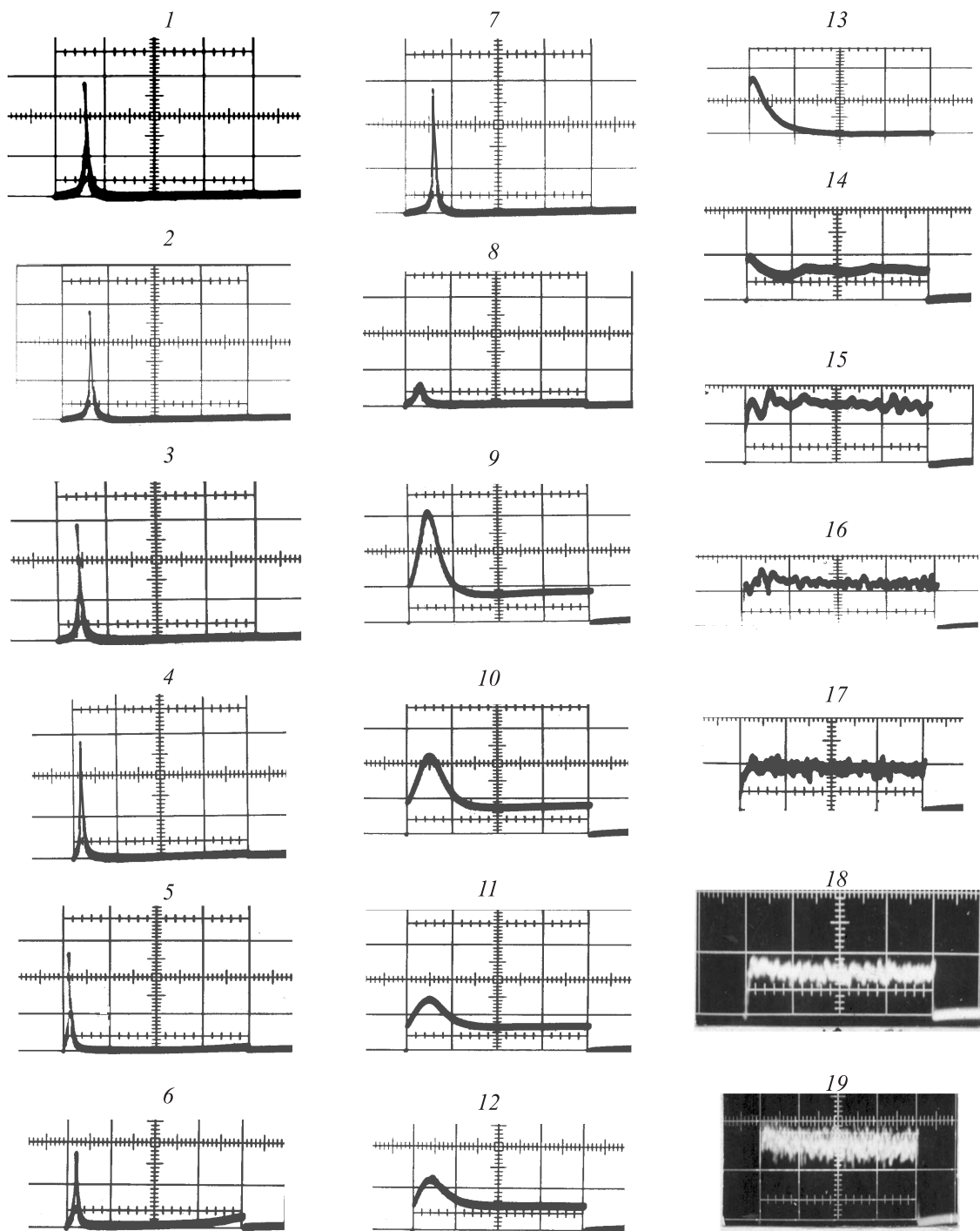
В настоящей работе быстрый „мгновенный“ нагрев до некоторой температуры достигается джоулевым самонагревом в режиме непрерывного приложенного высокого напряжения смещения на диод при П-образном импульсном освещении (режим А, рис. 1) и при непрерывном освещении и П-образном импульсном высоком напряжении (режим Б, рис. 2). В режимах А и Б длительность импульсов  $t_i$  была значительно меньше паузы  $t_p$ . Время повторения импульсов света или напряжения подбирались так, чтобы амплитуда и форма импульсных значений фототока не зависели от частоты повторения импульсов. Результаты исследования кинетики фотопроводимости (ФП) в зависимости от температуры, полученные в импульсных режимах А и Б, приведены на рис. 1, 2. На осциллограммах видны выбросы тока, амплитуда и форма которых зависят от заданной температуры гетероперехода. Из анализа осциллограмм следует, что в кинетике ФП (в форме выбросов тока) длительность переднего фронта  $t_n$  в режиме А, в течение которого ток достигает максимального амплитудного (пикового) значения, с ростом



**Рис. 1.** Зависимость индуцированной ФП от температуры в режиме А при  $U = 400$  В. Осциллограммы сняты при  $T$ , К: 1 — 80, 2 — 85, 3 — 93, 4 — 103, 5 — 129, 6 — 143, 7 — 146, 8 — 153, 9 — 160, 10 — 168, 11 — 175, 12 — 185, 13 — 190, 14 — 196, 15 — 203, 16 — 209; чувствительность по вертикали, А/см: 1 —  $1 \cdot 10^{-2}$ , 2–5 —  $2 \cdot 10^{-3}$ , 6–11 —  $2 \cdot 10^{-4}$ , 12 —  $1 \cdot 10^{-4}$ , 13–16 —  $1 \cdot 10^{-5}$ . Развертка 0.5 с/см.

температуры гетероперехода от 80 до 130 К растет от 0.5 до 0.8 с. Длительность заднего фронта  $t_c$  (форма спада) тока остается неизменной (осциллограммы 1–5, режим А, рис. 1). В области температур  $T = 143–175$  К (осциллограммы 6–10, режим А, рис. 1) на переднем

фронте импульса фототока наблюдаются скачок и линейное нарастание тока со спадом продолжительностью не более 1 с и затем формируется почти стационарное протекание тока до окончания длительности импульса света. После выключения импульса света наблюдается спад



**Рис. 2.** Зависимость индуцированной ФП от температуры в режиме Б при  $U = 400$  В. Осциллограммы сняты при  $T, \text{К}$ : 1 — 80, 2 — 85, 3 — 93, 4 — 96, 5 — 108, 6 — 118, 7 — 129, 8 — 143, 9 — 145, 10 — 150, 11 — 153, 12 — 160, 13 — 160, 14 — 164, 15 — 173, 16 — 180, 17 — 185, 18 — 188, 19 — 192; чувствительность по вертикали, А/см: 1–8 —  $1 \cdot 10^{-2}$ , 9–11 —  $1 \cdot 10^{-3}$ , 12, 13 —  $2 \cdot 10^{-4}$ , 14–19 —  $1 \cdot 10^{-5}$ . Развертка 0.5 с/см.

ФП с постоянным временем релаксации  $\tau \sim 0.2\text{--}0.5$  с, что может быть связано со скоростью установления теплового равновесия диода. Далее в области температур  $T = 175\text{--}203$  К наблюдаются своеобразные колебания тока с выбросами (осциллограмма 11,  $T = 175$  К), переходящие в регулярные синусоидальные колебания с

амплитудой в среднем  $2 \cdot 10^{-5}$  А при постоянной составляющей  $1 \cdot 10^{-4}$  А (осциллограмма 12,  $T = 518$  К). В области температур  $T = 190\text{--}209$  К колебания приобретают высокочастотный характер.

В режиме Б при постоянном освещении полученные импульсы тока в зависимости от температуры диода

при подаче импульса высокого напряжения имеют следующие характерные черты: амплитуда остроконечного вида импульса (тока) падает, длительность фронта  $t_n$  сокращается от 0.26 до 0.1 с с ростом температуры диода от 80 до 130 К (осциллограммы 1–8,  $T = 80–143$  К). В области  $T = 145–160$  К наблюдаются скачки фототока, величина которого падает от  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$  А, и выброс фототока приобретает треугольный вид с длительностью 0.5 с, его амплитуда с ростом температуры также снижается. Однако после выброса в течение импульса фототок протекает на уровне значения скачка (осциллограммы 9–12,  $T = 150–160$  К). В осциллограмме 13 на начальной стадии наблюдается скачок тока, напоминающий характер „вспышки“ [4]. Это вызвано тем, что гетеропереход, возможно, „мгновенно“ нагревается проходящим током до некоторой температуры (аналогично индуцированной ФП при подаче примесного света) и происходит повышение проводимости („индуцированная фото-термопроводимость“) [4]. В области температур  $T = 160–192$  К наблюдаются колебания тока с амплитудой  $(3–5) \cdot 10^{-6}$  А на уровне фототока  $\sim 10^{-5}$  А независимо от режимов исследования. В области температур  $T = 195–203$  К наблюдается рост частоты с переходом на подобное высокочастотным „шумовым“ колебаниям (рис. 1, 2) [5].

## Обсуждение результатов

В [1–3, 6–9] нами была разработана модель встречно-включенных диодов (двух контактов  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}(\text{Mn})\text{-Mn}_4\text{Si}_7$ ) и рассмотрено распределение электрических полей при приложении внешнего напряжения смещения к структурам  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}(\text{Mn})\text{-Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}(\text{Mn})\text{-M}$ , освещенным собственным светом. При этом один контакт был включен в прямом направлении, а второй — в обратном. Также надо иметь в виду, что ток через структуры протекает один и тот же, а напряжения на контактах различные. На барьере, который смещен в прямом направлении, напряжение существенно меньше, чем напряжение на обратносмещенном контакте. Поэтому на обратносмещенном контакте диода на границе раздела между высшим силицидом марганца (ВСМ) и  $\text{Si}(\text{Mn})$  рассеиваемая мощность будет существенно больше, чем на прямосмещенном контакте [1–3, 6–8].

Теперь обсудим полученные осциллограммы в двух режимах А и Б при постоянном напряжении смещения  $U = 400$  В при импульсном освещении или при постоянном освещении, при импульсном напряжении в зависимости от температуры гетероперехода. Результаты исследования в области температур 80–130 К (рис. 1, осциллограммы 2–5 в режиме А и рис. 2 осциллограммы 1–8 в режиме Б) показывают, что время нарастания и спада выбросов фототоков (их фронты) имеют асимметричный характер (в зависимости от времени и

температуры). Асимметричность в характере нарастающих токов заключается в том, что в кинетике ФП длительность переднего фронта  $t_n$  в режиме А, в течение которого выброс тока достигает максимального амплитудного значения, растет при увеличении температуры гетероперехода от  $t_n = 0.5$  до 0.8 с, а в режиме Б  $t_n$  сокращается от 0.26 до 0.1 с. Это различие  $t_n$  в режимах А и Б может быть связано со скоростью перезарядки уровней марганца (т.е. степенью заполнения уровней Mn электронами). Так как в режиме А освещение импульсное, а в режиме Б постоянное, то до подачи импульсов напряжения к диоду, уровни Mn успевают перезарядаться, и при подаче импульса напряжения протекаемый фототок, возможно, вызывает „мгновенный“ нагрев обратносмещенного контакта, поэтому в режиме Б  $t_n$  укорачивается. В указанных областях температур в режиме А амплитуда выбросов тока убывает быстрее (примерно на порядок), чем в режиме Б. Это связано с тем, что в режиме А гетеропереход находится под воздействием постоянного приложенного напряжения смещения  $U$ , и протекаемый темновой ток после импульсного освещения подпитывает выделение тепла, тем самым, возможно, ускоряя процесс температурного гашения ФП [3].

В области температур  $T = 143–175$  К наблюдаемые скачки токов с последующим нарастанием во времени и их спады (в режимах А и Б) можно объяснить следующим образом.

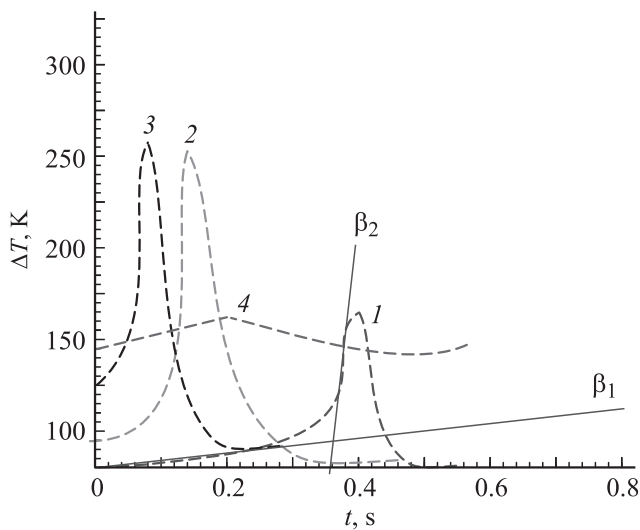
1. Скачки фототоков  $I_0$  вызваны соответствующей концентрацией дырок в валентной зоне  $\text{Si}(\text{Mn})$  (базе гетероперехода), которые обусловлены переходом электронов из валентной зоны на акцепторный уровень  $E_g + (0.18 \pm 0.02)$  eV при заданной температуре  $T_0$  [1, 6, 7].

2. После скачка нарастание фототока  $I_0 + I(t)$  со временем вызывает нарастание выделяемой тепловой мощности  $P(t) = U(I_0 + I(t))$ , и в то же время происходит нарастание температуры  $T_0 + T(t)$  на обратносмещенном контакте гетероперехода.

Таким образом, возникает сложная теплоэлектрическая связь между зависимостью величины тока от времени и температуры, выделяемой в переходном слое на границе раздела между ВСМ– $\text{Si}(\text{Mn})$  и слоем базы гетероперехода, примыкающим к переходному слою. Распределение температуры в базе гетероперехода, смещенного в обратном направлении, можно описать формулой [10, 11]

$$T(x, t) = I_{\text{rev}}(t)U_{\text{rev}} \frac{1}{\lambda s} (l - x) + T_0,$$

где  $T_0$  — заданная термостатом температура,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности кремния,  $s$  — площадь перехода и  $l$  — слой, примыкающий к переходному слою между ВСМ и  $\text{Si}(\text{Mn})$ , который, согласно [10], оценивается в несколько диффузионных длин свободного пробега носителей заряда (электронов).

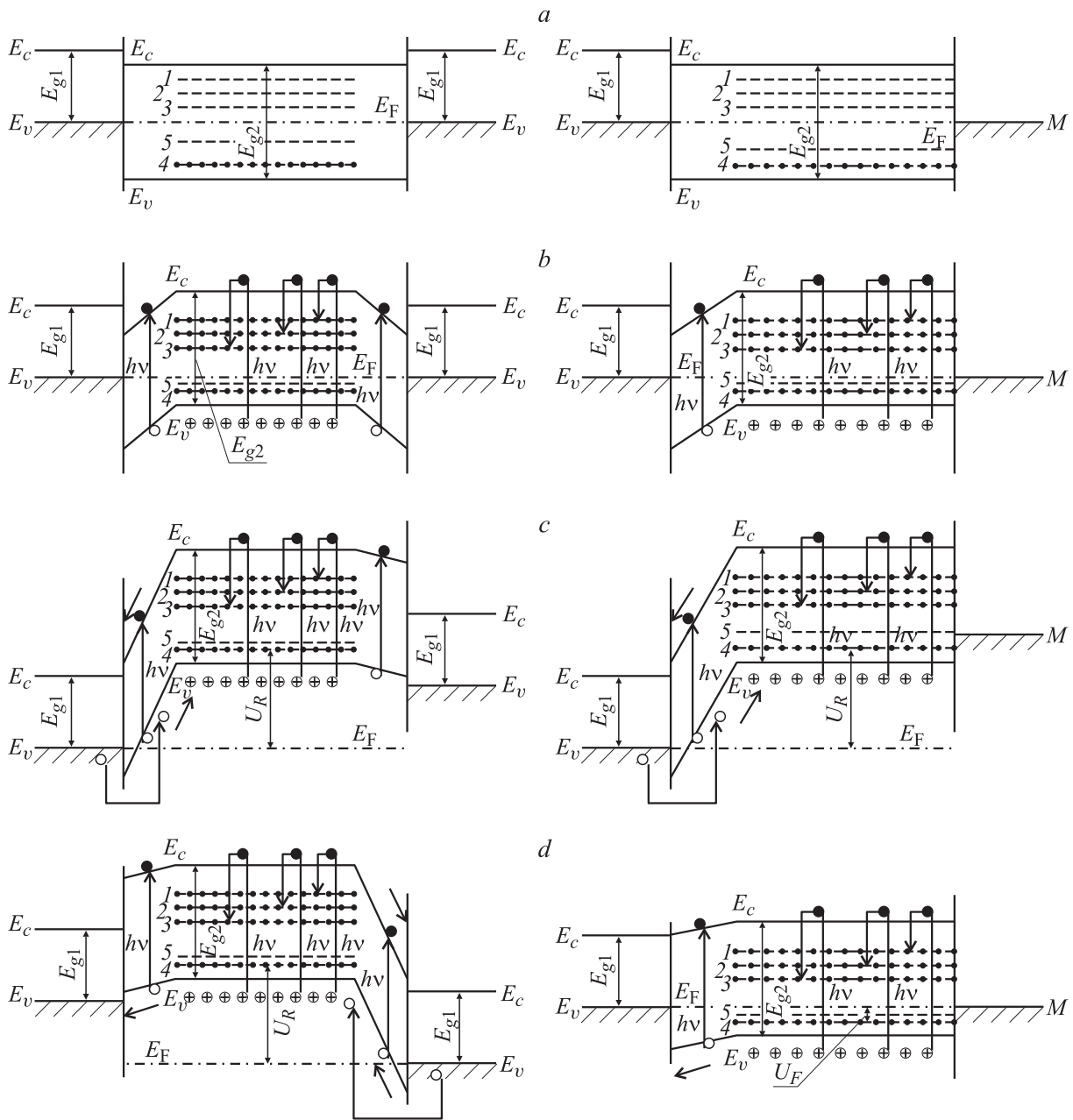


**Рис. 3.** Расчетные кривые температурного перегрева в процессе протекания тока во времени. Токковые значения для соответствующих времен взяты из рис. 1 и 2: кривая 1 построена из осциллограммы 1, режим А,  $T_0 = 80$  К; кривая 2 построена из осциллограммы 3, режим Б,  $T_0 = 93$  К; кривая 3 построена из осциллограммы 4, режим Б,  $T_0 = 96$  К; кривая 4 построена из осциллограммы 9, режим Б,  $T_0 = 145$  К; скорость нагрева:  $\beta_1 = 42$  deg/s,  $\beta_2 = 3 \cdot 10^3$  deg/s.

Зависимость температуры от времени и ее распределение в базе (Si(Mn))  $T(x, t)$  от  $I_{rev}(t)$ , строилась графически на основании полученных осциллограмм (рис. 3). При расчетах коэффициента теплопроводности считали  $\lambda \approx 1.4$  W/(cm·K). Это значение удовлетворяет области температурного гашения ФП  $T = 220\text{--}240$  К, соответствующей максимальному импульсному значению тока через диод [8]. С одной стороны, известно, что для чистого кремния в области  $T = 80\text{--}300$  К  $\lambda(T)$  изменяется от 14.5 до 1.45 W/(cm·K) [12]. С другой стороны, в гетеропереходе базовая область Si(Mn) граничит с пористой прослойкой кремния с теплопроводностью  $\lambda \sim 1.5 \cdot 10^{-4}$  W/(cm·K) в контакте с ВСМ [6,8]. Такая граница раздела между  $Mn_4Si_7$  и Si(Mn) с обеих сторон гетероперехода, естественно, способствует накоплению тепла [13] в базовой области при протекании тока и тем самым обуславливает образование быстрого нагрева и вызывает повышение проводимости (выброс тока). Поэтому полагаем  $\lambda = 1.45$  W/(cm·K) при расчете распределения температуры по приведенной выше формуле в обратносмещенном контакте гетероперехода. На рис. 3 представлен рост температуры, рассчитанный в зависимости от выделяемой тепловой мощности  $P(t) = U(I_0 + I(t))$  во времени. Рассчитанные из кривых  $T(I, t)$  скорости нагревов показали, что до появления выброса фототока  $\beta_1 = 42$  deg/s, а в состоянии резкого роста фототока  $\beta_2 = 3 \cdot 10^3$  deg/s. Оценены величины градиентов температур  $\Delta T/\Delta x$  на переходном слое вбли-

зи границы раздела  $Mn_4Si_7/Si(Mn)$  ( $\Delta x \sim 200$  Å) [1] и в примыкающем к базе Si(Mn) слое толщиной порядка диффузионной длины  $l \sim 2$  mm (при времени жизни электронов  $\tau_n \sim 10^{-3}$  s и  $D = 35$  cm<sup>2</sup>/s [14]). При  $t_n = 0.3$  s и скорости нагрева  $\beta_1$  до начала выброса тока имеем  $\Delta T/\Delta x = \beta t_n/\Delta x = 6.3 \cdot 10^6$  K/cm и в процессе выброса тока для  $t_n \leq 0.1$  s и  $\beta_2$  имеем  $\Delta T/\Delta x = \beta t_n/\Delta x \geq 1.5 \cdot 10^8$  K/cm. При диффузионной длине  $l \sim 2$  mm и  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , соответствующих временам  $t_n$ , вычисленные величины градиентов оказались  $\Delta T/\Delta x \sim 63$  K/cm и  $\sim 1.5 \cdot 10^3$  K/cm. Таким образом, в согласии с [4,14], наблюдаемые нами индуцированные фото-термопроводности в гетеропереходах  $Mn_4Si_7\text{--}Si(Mn)\text{--}Mn_4Si_7$  и  $Mn_4Si_7\text{--}Si(Mn)\text{--}M$  связаны с большими („гигантскими“) градиентами температуры и, видимо, именно они обуславливают особенности инжекционного протекания тока.

Рассмотрим распределение температуры на границах по длине базы гетероперехода, оцененное по приведенной выше формуле. На первый взгляд из формулы следует, что для данного значения тока во времени  $T_{max}$  при  $x = 0$  и  $T = T_0$  при  $x = l$ . Такие граничные условия вытекают из зонной диаграммы (рис. 4), построенной на основании исследования распределения потенциала и распространения тепла в обратносмещенном контакте [1,8]. Дополнительным подтверждением этому является возможность визуального наблюдения кипения азота только в одной приконтактной области [6,8]. Из качественного анализа следует, что увеличение протекаемого тока во времени вызывается рассеиваемой мощностью в переходной области и примыкающей к ней области толщиной, равной длине свободного пробега (порядка 2 mm). Образующиеся градиенты температур способствуют „мгновенному“ выбросу прилипших электронов из донорных уровней в зону проводимости, и в течение времени жизни электронов  $\tau_n$  весь протекаемый ток будет состоять из дрейфового тока, обусловленного генерацией носителей в переходной (обедненной) области, и диффузионного (электронного) тока, обусловленного генерацией носителей в слое (длиной свободного пробега) объема базы (Si(Mn)), и их диффузией к обратносмещенному переходу [12]. При таких перегревах, естественно, повторное прилипание электронов на донорные уровни марганца исключено и тем самым рекомбинация электронов через неконтролируемые центры с дырками в валентной зоне приводит к уменьшению проводимости указанного слоя базы. Следовательно, это может привести к утолщению высокоомного слоя и к перераспределению электрического поля в базе диода (к срыву тока ограниченного пространственного заряда [2,3]). В результате протекаемый ток резко падает (на несколько порядков), соответственно падает джоулевый самонагрев, что ведет к охлаждению гетероперехода до температуры жидкого азота. При собственном освещении базы гетероперехода в запрещенной зоне кристалла Si(Mn) будет происходить возбуждение с



**Рис. 4.** Зонные энергетические диаграммы диодов с контактами  $Mn_4Si_7-Si(Mn)-Mn_4Si_7$  и  $Mn_4Si_7-Si(Mn)-M$  при низкой температуре [1]: *a* — при термодинамическом равновесии в темноте, *b* — при облучении светом без смещения, *c* — при облучении светом и положительном смещении к  $Mn_4Si_7$  (ВСМ), *d* — при облучении светом и отрицательном смещении к ВСМ. В диаграммах указаны:  $E_{g1}$  — запрещенная зона ВСМ имеет 0.6–0.72 eV,  $E_{g2}$  — запрещенная зона  $Si\langle Mn \rangle$ ,  $E_F$  — уровень Ферми ВСМ; 1, 2, 3 — донорные уровни марганца, 4 — уровень Бора, 5 — акцепторный уровень  $E_A + 0.18$  eV,  $U_F$  — прямое напряжение,  $U_R$  — обратное напряжение. На рисунке не приведено положение квазиуровней Ферми электронов и дырок, М — металлический контакт.

$h\nu \geq 1.12$  eV, переводящее электроны из валентной зоны в зону проводимости с последующим заполнением примесных уровней марганца. При этом в валентной зоне образуются дырки, часть которых захватывается неконтролируемыми центрами  $N_r$ , а другая часть будет участвовать в протекании тока [1–4].

Анализ низкочастотных колебаний тока в гетеропереходах будет представлен в отдельной работе.

## Заключение

1. Исследована кинетика протекания фототока при „собственном“ освещении с  $h\nu \geq 1.12$  eV в гетеропереходах  $Mn_4Si_7-Si(Mn)-Mn_4Si_7$  и  $Mn_4Si_7-Si(Mn)-M$  при высоких приложенных напряжениях в области температур 80–200 К.

2. Установлено, что при низких температурах и постоянном высоком приложенном напряжении при освещении с  $h\nu \geq 1.12$  eV гетеропереходов  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-M}$  протекаемый фототок, рассеиваемая мощность и температура на обратном смещенном контакте гетероперехода являются функцией времени.

3. Температурные зависимости амплитуд и формы кривых фототока указывают на то, что в режиме А — непрерывно приложенного высокого напряжения смещения на диод при П-образном импульсном освещении (80–90 К) и В — непрерывном освещении и П-образном импульсном высоком напряжении (80–140 К) передний фронт импульса фототока состоит из двух участков: первый участок соответствует медленно нарастающему малому значению тока с крутизной  $\sim (2-4) \cdot 10^{-4}$  А/с и второй участок с резким нарастанием тока с крутизной  $\sim 0.1-1$  А/с. По значениям крутизны токов рассчитаны скорости нагревов  $\beta_1 = 42$  deg/s и  $\beta_2 = 3 \cdot 10^3$  deg/s.

4. Оценены величины градиентов температур  $\Delta T/\Delta x$  на переходном слое, соответствующем границе раздела  $\text{Mn}_4\text{Si}_7/\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$   $\Delta T/\Delta x = 6.3 \cdot 10^6$  К/см при  $t_n = 0.3$  с и  $\beta_1$  и  $\Delta T/\Delta x \geq 1.5 \cdot 10^8$  К/см при  $t_n \leq 0.1$  и  $\beta_2$ .

5. Показано, что джоулевым самонагревом можно достичь больших скоростей нагрева в обратном смещенном контакте гетеропереходов. Это обеспечивает быстрое нагревание, подобное прямогольной ступени возбуждения, которое эквивалентно включению длинноволнового (примесного) освещения.

Авторы выражают признательность за ценные замечания и предложения при обсуждении работы Р.А. Муминову, А. Рисбаеву и Л.П. Булат.

Работа поддержана грантом Минвуза Республики Узбекистан № ОТ-Ф2-078.

## Список литературы

- [1] Шукурова Д.М., Орехов А.С., Шарипов Б.З., Клечковская В.В., Камилов Т.С. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 10. С. 44–49.
- [2] Kamilov T.S., Sadullaev B.L., Ganiev U.Sh., Kamilov B.T. // Semicond. Sci. Technol. 1998. Vol. 13. P. 496.
- [3] Kamilov T.S., Chirva V.P., Kabilov D.K. // Semicond. Sci. Technol. 1999. Vol. 14. P. 1012.
- [4] Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1963. 496 с.
- [5] Мясин Е.С. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 2. С. 87–94.
- [6] Shukurova D.M., Kamilov T.S., Sharipov B.Z., Klechkovskaya V.V., Orekhov A.S., Feodorov M.I. // Proc. of the 29<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics. Shanghai, China, 2010. P. 216.
- [7] Бахадырханов М.К., Камилов Т.С., Хусанов А.Ж., Ивакин Г.И., Занавескина И.С. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2002. № 6. С. 100.
- [8] Шукурова Д.М., Камилов Т.С., Шарипов Б.З., Клечковская В.В., Орехов А.С. // Узбек. физич. журн. 2010. Т. 12. № 3. С. 132–138.
- [9] Камилов Т.С., Шарипов Б.З., Клечковская В.В., Орехов А.С. // Узбек. физич. журн. 2011. Т. 13. № 4. С. 311–317.
- [10] Зайцев Ю.В., Громов В.С., Григораши Т.С. Полупроводниковые термоэлектрические преобразователи. М.: Радио и связь, 1985. 120 с.
- [11] Юдаев Б.Н. Теплопередача. М.: Высшая школа, 1973. 350 с.
- [12] Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов Пер. с англ. / Под ред. А.Ф. Трутко. М.: Энергия, 1973. 655 с.
- [13] Беляев А.Е., Басанец В.В., Болтовец Н.С. и др. // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 2. С. 256–262.
- [14] Анатычук Л.И., Булат Л.П. Полупроводники в экстремальных температурных условиях. СПб.: Наука, 2001. 224 с.