

## Исследование токовых неустойчивостей 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. Камиллов\*<sup>¶</sup>, Л.Л. Аксенова<sup>†¶</sup>, Б.З. Шарипов\*, И.В. Эрнст\*

\* Ташкентский государственный технический университет,  
100095 Ташкент, Узбекистан

† Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, Российской академии наук,  
119333 Москва, Россия

(Получена 24 февраля 2015 г. Принята к печати 12 марта 2015 г.)

Исследованы особенности токовых неустойчивостей 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 низких температурах и при „собственном“ освещении с  $h\nu \geq 1.12$  эВ. Показано, что при высоких приложенных напряжениях можно получить автоколебания низкой частоты, связанные с усилением и гашением фотопроводимости.

### Введение

В работах [1,2] изложены результаты исследований кинетики протекания фототока 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 „собственном“ освещении с  $h\nu \geq 1.12$  эВ и при высоких приложенных напряжениях. Проведен анализ температурных зависимостей величины и формы нарастания фототока во времени и установлено, что джоулевым самонагревом возможно достижение скорости нагрева  $\beta_1 = 42$  deg/c и  $\beta_2 = 3 \cdot 10^3$  deg/c и градиентов температур на переходном слое между  $\text{Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ :  $\frac{\Delta T}{\Delta x} = 6.3 \cdot 10^6$  К/см для  $\beta_1$  и  $\frac{\Delta T}{\Delta x} \geq 1.5 \cdot 10^8$  К/см для  $\beta_2$ .

Цель настоящей работы заключается в выяснении природы токовых неустойчивостей в гетеропереходах  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{—Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{—Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{—Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{—M}$ .

### 1. Экспериментальный материал

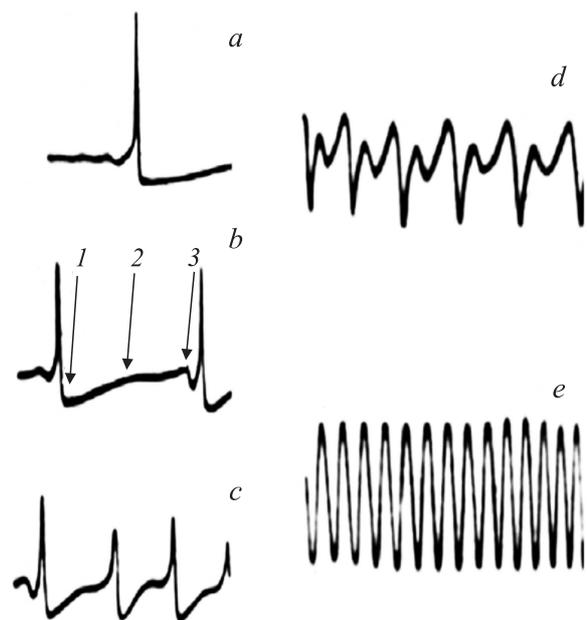
Исследуемые гетеропереходы (структуры, диоды)  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{—Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{—Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{—Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{—M}$  получены путем диффузионного легирования кремния марки КДБ-10 марганцем по технологии, описанной в работах [3,4]. Параметры структур следующие: слой ВСМ  $\text{Mn}_4\text{Si}_7$ , *p*-типа, толщина 5–7 микрон, проводимость  $\sigma \sim 10^2$  (Ом·см)<sup>-1</sup>, концентрация носителей  $\sim 10^{19-20}$  см<sup>-3</sup>; база структуры  $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ , проводимость *i*-типа, концентрация носителей  $10^{11-10^{12}}$  см<sup>-3</sup>; блокирующий контакт (металл М) создан путем напыления Al или нанесения сплавов NiGa или AlGa. Площади токовых контактов к ВСМ и М составляют  $2 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup> с длиной базовых областей от 0.4 до 1 см. Электрические и фотоэлектрические характеристики структур определялись непосредственно в среде жидкого азота, а также в специальном оптическом криостате, заданные температуры в котором поддерживались электронным управлением током нагревателя, на котором монтировалась исследуемая структура. В качестве источника света

использовался арсенид-галлиевый светодиод, мощность потока излучения которого регулировалась заданием прямого тока диода.

Вид фотовольт-амперных характеристик (ФВАХ) и соответствующие фотоэлектрические свойства гетероструктуры [1,2] при высоких приложенных напряжениях смещения указывают на возможность проявления токовых неустойчивостей в кинетических режимах.

Исследования токовых неустойчивостей проводились при постоянном напряжении смещения  $U = 600$  В и при различных интенсивностях потока излучения. Фототочевый сигнал регистрировался осциллографом С1-486.

На рис. 1 показан процесс формирования импульса фототока в зависимости от интенсивности потока



**Рис. 1.** Осциллограммы фототока при различной освещенности ( $L$ ) образца.  $T = 80$  К,  $h\nu = 1.12$  эВ;  $L$ , отн.ед.:  $a - 1$ ,  $b - 1.25$ ,  $c - 1.9$ ,  $d - 2.1$ ,  $e - 2.34$ . Чувствительность по вертикали:  $a-c - 2$ ,  $d - 1$ ,  $e - 0.5$  В/см.  $R_H = 1$  кОм, развертка 1.6 с/см, приложенное напряжение  $U = 600$  В.

<sup>¶</sup> E-mail: tulkyn@mail.ru

<sup>¶¶</sup> E-mail: aksenovall@mail.ru

излучения. Из рассмотрения осциллограмм на рис. 1 видно, что частота появления пиков в кривой релаксации фототока напрямую связана с интенсивностью потока излучения.

Кривую фототока (рис. 1, *b*) можно разбить на ряд последовательных участков: участок с некоторым квазиустановившимся значением (рис. 1, *b*, между стрелками 1 и 2, условно назовем его „полка“), затем участки с незначительным и кратковременным подъемом фототока и с таким же незначительным и кратковременным спадом фототока, а следом наблюдается мощный выброс фототока, амплитуда которого весьма значительна (рис. 1, *a–c*).

Как видим из осциллограмм, частота мощных выбросов (пиков) тока зависит от интенсивности потока излучения. Из рис. 1 видно, что с увеличением интенсивности потока излучения промежутки времени между пиками сокращаются, наблюдается нарастание фототока на участке между стрелками 1 и 2 (рис. 1, *b*), а участки с малыми подъемами и спадами исчезают (участок за стрелкой 3 на рис. 1, *b* и *c*). Осциллограммы рис. 1, *d* и *e* иллюстрируют развитие процесса: последующее увеличение интенсивности потока излучения приводит к увеличению частоты выбросов (пиков) фототока и уменьшению их амплитуды таким образом, что кривая фототока превращается в низкочастотную гармоническую кривую (т.е. возникают гармонические колебания довольно низкой частоты). Дальнейшее же увеличение интенсивности потока излучения приводит к срыву наблюдаемых колебаний.

## 2. Обсуждение результатов

Предварительно укажем, что: 1) на границе разделов гетеропереходов  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{–Si(Mn)–Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{–Si(Mn)–M}$  происходит выделение тепла на обратно смещенном контакте вследствие прохождения через него тока [5,6]; 2) изучение ФВАХ [5] данных гетеропереходов дало возможность построения энергетических зон в состоянии прохождения фототока при низких температурах (зонная диаграмма, рис. 2); 3) в работе [7] описаны особенности усиления и гашения фотопроводимости (ФП) в данных гетероструктурах и показано, что при низких температурах высокоомная базовая область гетероструктуры при освещении собственным светом становится низкоомным проводящим слоем, прилегающим к переходной *i*-области структуры, а при нагреве структуры проводящий слой становится высокоомным и вызывает резкое гашение ФП (величина ФП снижается на порядок).

Теперь приступим к обсуждению природы токовых неустойчивостей в гетеропереходах (диодах)  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{–Si(Mn)–Mn}_4\text{Si}_7$  и  $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{–Si(Mn)–M}$ , принимая во внимание данные зонной диаграммы [5] и особенности тепловыделения на границе раздела ВСМ и Si(Mn) при прохождении тока [6]. Учтем также степень

заполненности донорных уровней марганца:  $E_c - 0.3$  эВ,  $E_c - 0.42$  эВ,  $E_c - 0.5$  эВ (на рис. 2 эти уровни обозначены цифрами 1–3).

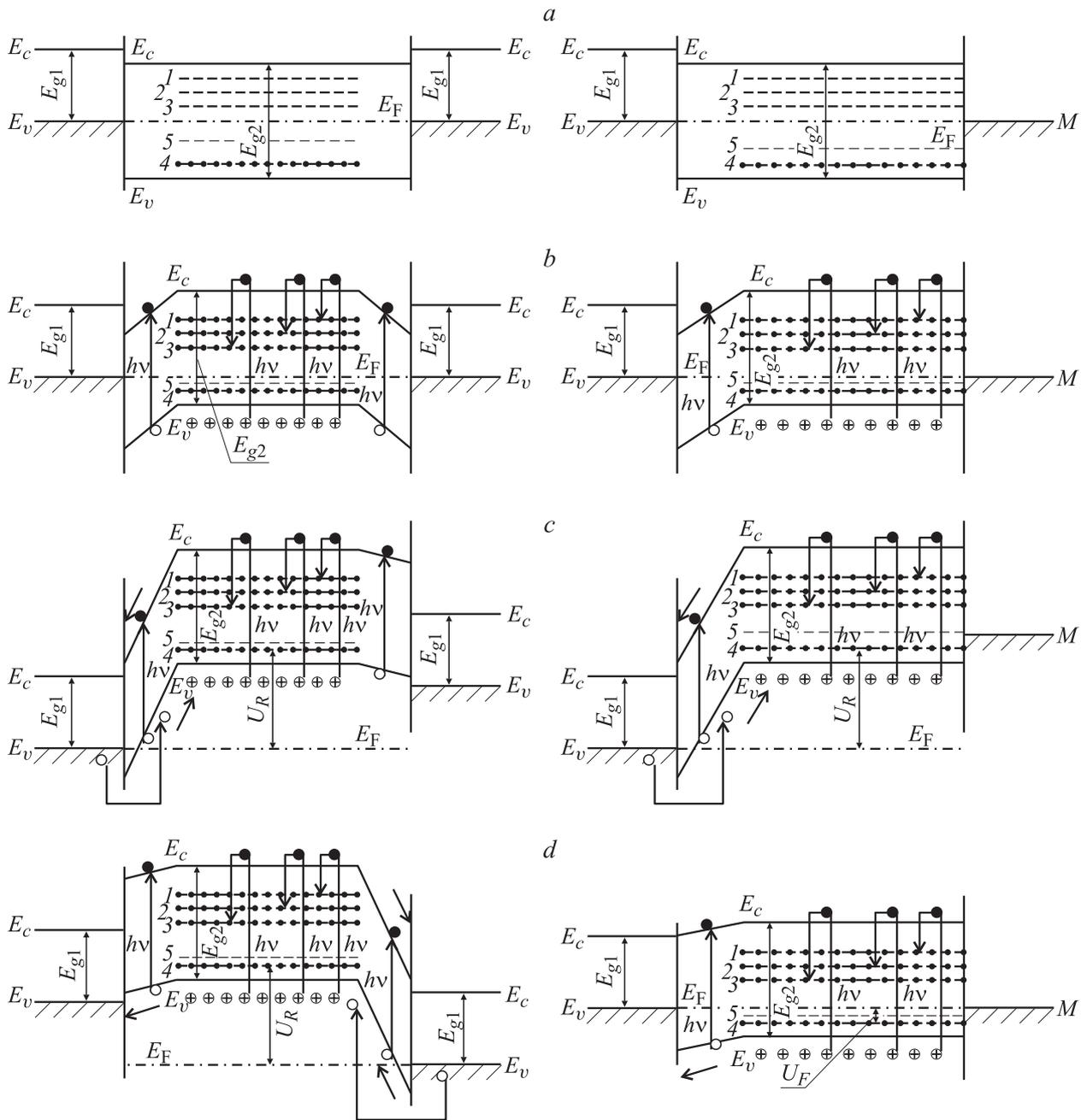
1. Тепловая мощность  $P = UI$ , выделяемая на границе раздела между ВСМ и Si(Mn), согласно [6], распространяется в основном в сторону кремния от обратно смещенного контакта в сторону контакта прямого смещения. Очевидно, что это обстоятельство приводит к увеличению температуры на границе раздела между ВСМ и Si(Mn) и прилегающих областей. Увеличение температуры в свою очередь приводит к увеличению фототока и соответственно увеличению рассеиваемой мощности в структуре. Таким образом, возникает своеобразная теплоэлектрическая обратная связь между величиной фототока и температурой как в переходном слое на границе раздела между ВСМ и Si(Mn), так и в базе диода.

2. Рассмотрим, какую роль играет данная теплоэлектрическая обратная связь между величиной фототока и температурой, существующей на границе раздела между ВСМ и Si(Mn), при освещении собственным светом и при значительных по величине электрических полях.

Обратимся к зонной диаграмме (рис. 2). Из [2–6] известно, что базовая область (Si(Mn)) диода при низких температурах и освещении собственным светом становится квазиравновесным дырочным полупроводником с концентрацией дырок  $p \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . В то же время квазиуровень Ферми дырок  $E_{F_p}$ , в запрещенной зоне кремния принимает значение  $E_v + E_{F_p} \cong 0.1$  эВ, а квазиуровень Ферми электронов  $E_{F_n}$  за счет прилипания электронов на донорные уровни марганца будет подниматься от середины запрещенной зоны на величину  $E_c - E_{F_n} \leq 0.3$  эВ к зоне проводимости.

3. При джоулевом самонагреве генерированные из валентной зоны электроны переходят на уровень  $E_v + (0.18 \pm 0.02)$  эВ (так как квазиуровень Ферми  $E_{F_p}$  находится ниже уровня  $E_v + (0.18 \pm 0.02)$ ). По мере заполнения этого уровня электронами квазиуровень Ферми дырок  $E_{F_p}$  смещается вверх, к середине запрещенной зоны кремния  $0.5E_g$ , и тем самым происходит рост концентрации дырок в валентной зоне. Одновременно в процессе нагрева квазиуровень Ферми электронов  $E_{F_n}$  смещается к середине запрещенной зоны кремния  $0.5E_g$ . Однако энергетические значения акцепторного уровня  $E_v + 0.18$  эВ (уровень 5 на рис. 2) и донорных уровней марганца 1, 2 отличаются почти в 2 раза (см. выше), что позволяет на основании материалов [1,2] экспериментально оценивать влияние каждого уровня на характер изменения ФП в соответствующей температурной области в процессе возрастания температуры.

В процессе смещения  $E_{F_n}$  начинают генерироваться электроны с донорных уровней прилипания марганца в зону проводимости. В момент совпадения квазиуровня Ферми электронов  $E_{F_n}$  с уровнем прилипания 1 фототок достигает некоторого максимума (рис. 1, *b*, стрелка 3). Дальнейшее смещение квазиуровня Ферми



**Рис. 2.** Зонные энергетические диаграммы при низкой температуре диодов с контактами  $Mn_4Si_7-Si(Mn)-Mn_4Si_7$  и  $Mn_4Si_7-Si(Mn)-M$  [9]: *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 эВ;  $E_{g2}$  — запрещенная зона Si(Mn);  $E_F$  — уровень Ферми ВСМ; 1–3 — донорные уровни марганца; 4 — уровень Бора; 5 — акцепторный уровень  $E_v + 0.18$  эВ;  $U_F$  — прямое напряжение;  $U_R$  — обратное напряжение. На рисунке не приведено положение квазиуровней Ферми электронов и дырок,  $M$  — металлический контакт.

электронов  $E_{F_n}$  в сторону  $0.5E_g$  сопровождается незначительным провалом в кривой фототока (участок после стрелки 3). Последующий рост температуры диода приводит к полному опустошению уровня 1, а квазиуровень Ферми электронов  $E_{F_n}$  приближается ко второму уровню прилипания 2. Далее  $E_{F_n}$  совпадает с уровнем 2 и

опускается еще ниже, а так как донорные уровни 2 и 3 энергетически близки друг к другу и близки к середине запрещенной зоны кремния, то следом за уровнем 2 опустошается и уровень 3. Совместное действие электронов, выброшенных с уровней 2 и 3, вызывает мощный выброс фототока [1,2].

Таким образом, по кривым релаксации можно судить об изменении дырочного и электронного токов во времени и их рекомбинации через неконтролируемый уровень  $N_T$  с дырками валентной зоны [1–6]. В результате концентрация дырок в валентной зоне уменьшается и, следовательно, повышается сопротивление базовой области Si(Mn) диода и тем самым создаются условия для резкого температурного гашения фотопроводимости (ТГФ) [6]. Другими словами, значительная величина фототока приводит к интенсивному нагреву переходной области структуры. Нагрев в свою очередь приводит к резкому гашению фототока (на порядки), во-первых, ростом сопротивления базовой области, приводящего к расширению переходной области ( $i$ -области), за счет включения в нее образующегося высокоомного расширяющегося промежутка базы диода и соответственного уменьшения электрического поля в базе [5] и соответственно мощность  $P$  на границе раздела между ВСМ и Si(Mn) уменьшается. Это значит, что нагрев гетероструктуры прекратился и ее температура падает за счет хладопровода, при этом уровни марганца за счет неизменной интенсивности потока излучения заполняются электронами, выброшенными из валентной зоны в зону проводимости [6]. Тем самым гетероструктура возвращается к исходному квазиравновесному состоянию, и процесс, описанный выше, повторяется.

### 3. Заключение

В результате проведенных исследований показано, что при „собственном“ освещении с  $h\nu \geq 1.12$  эВ в гетеропереходах  $Mn_4Si_7-Si(Mn)-Mn_4Si_7$  и  $Mn_4Si_7-Si(Mn)-M$  при высоких приложенных напряжениях можно получить автоколебания низкой частоты, связанные с усилением и гашением ФП. При этом хладопровод, на котором закреплен гетеропереход, выполняет функцию положительной обратной связи. При малых интенсивностях потока излучения формирование выбросов фототока напоминает работу блокинг-генератора, формирующего импульсы с большой скважностью. Близкие к гармоническим колебания фототока с малой амплитудой при относительно больших подаваемых интенсивностях потока излучения обусловлены неглубоким охлаждением гетероструктуры (температура которой не достигает температуры хладопровода).

Так как тепловые эффекты твердых тел связаны с их теплоемкостью и являются инерционными [8], частота возникающих колебаний не может быть значительной. Справедливость этого утверждения будет показана в последующих статьях.

О срыве рассматриваемых гармонических колебаний можно сказать, что при больших интенсивностях подаваемого потока излучения постоянная составляющая фототока структуры джоулевым теплом вызывает ее постоянный самонагрев, и температура структуры, как уже сказано выше, не достигает температуры хладопровода.

### Список литературы

- [1] Т.С. Камиллов, В.В. Клечковская, Б.З. Шарипов, Г.И. Ивакин. ЖТФ, **83** (6), 128 (2013).
- [2] Т.С. Камиллов, В.В. Клечковская, Б.З. Шарипов, А. Тураев. ЖТФ, **83** (8), 98 (2013).
- [3] T.S. Kamilov, B.L. Sadullaev, U.Sh. Ganiev, B.T. Kamilov. Semicond. Sci. Technol., **13**, 496 (1998).
- [4] T.S. Kamilov, V.P. Chirva, D.K. Kabilov. Semicond. Sci. Technol., **14**, 1012 (1999).
- [5] Д.М. Шукурова, А.С. Орехов, Б.З. Шарипов, В.В. Клечковская, Т.С. Камиллов. ЖТФ, **81** (10), 44 (2011).
- [6] Д.М. Шукурова, Т.С. Камиллов, Б.З. Шарипов, В.В. Клечковская, А.С. Орехов. Узб. физ. журн., **12** (3), 132 (2010).
- [7] Е.С. Камиллов, И.В. Эрнст, А.Ю. Самунин. ЖТФ, **84** (12), 96 (2014).
- [8] А.В. Лыков. *Теплообмен* (Справочник). 2-е изд., перераб. и доп. (М., Энергия, 1978).

Редактор Т.А. Полянская

### Study of Current Instabilities in $Mn_4Si_7-Si(Mn)-Mn_4Si_7$ and $Mn_4Si_7-Si(Mn)-M$ Heterojunctions

T.S. Kamilov\*, L.L. Aksenova<sup>+</sup>, B.Z. Sharipov\*, I.V. Ernst\*

\* Tashkent State Technical University,  
100095 Tashkent, Uzbekistan  
<sup>+</sup> Shubnikov Institute of Crystallography,  
Russian Academy of Sciences,  
119333 Moscow, Russia

**Abstract** In work studied peculiarities of current instabilities in  $Mn_4Si_7-Si(Mn)-Mn_4Si_7$  and  $Mn_4Si_7-Si(Mn)-M$  heterojunctions at low temperatures and at „inherent“ lighting with  $h\nu \geq 1.12$  eV the magnitude. It was establish that high applied voltage it is possible to get autooscillation low frequency depended with amplification and quenching the photoconduction.