

УДК 539.18

## АНОМАЛЬНО-ИНВЕРСИРУЕМЫЙ ФОТОВЕНТИЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ В КЛАСТЕРИЗОВАННОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ

*В. А. Дроздов, М. А. Дроздов, В. В. Ковальчук*

<sup>1</sup>Одесский институт Сухопутных войск

<sup>2</sup>Южноукраинский государственный педагогический университет им. К.Д.Ушинского

### Аннотация

#### АНОМАЛЬНО-ИНВЕРСИРУЕМЫЙ ФОТОВЕНТИЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ В КЛАСТЕРИЗОВАННОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ

*В. А. Дроздов, М. А. Дроздов, В. В. Ковальчук*

Представленная работа посвящена исследованию физических свойств кремниевых кластеров (К), дислоцированных в интерфейсе гетеропереходной матрицы на основе кремния и сернистой меди. Обнаружен ряд перспективных в практическом плане эффектов, присущих данной системе и зависящих от размеров кластеров. В частности, представлены данные об аномальном спектрально-инверсируемом фотовентильном эффекте (СФЭ), характерном для гетероперехода  $pCu_2S-K-nSi$  при размерах кластеров  $<10 \text{ \AA}$ . Предлагается обоснованный механизм СФЭ.

**Ключевые слова:** гетеропереход, кластер, аномальный фотовентильный эффект.

### Анотація

#### АНОМАЛЬНО-ИНВЕРСОВАННЫЙ ФОТОВЕНТИЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ У КЛАСТЕРИЗОВАННОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ

*В. О. Дроздов, М. О. Дроздов, В. В. Ковальчук*

Представлена работа посвящена исследованию физических свойств кремниевых кластеров (К), дислоцированных в интерфейсе гетеропереходной матрицы на основе кремния и сернистой меди. Выявлена низка перспективных в практическом плане эффектов, присущих данной системе и зависящих от размеров кластеров. В частности, представлены данные об аномальном спектрально-инверсованном фотовентильном эффекте (СФЭ), характерном для гетероперехода  $pCu_2S-K-nSi$  при размерах кластеров  $<10 \text{ \AA}$ . Запропоновано обгрунтованный механизм СФЭ.

**Ключові слова:** гетероперехід, кластер, аномальний фотовентильний ефект.

### Abstract

#### ANOMAL-INVERSIRSE PHOTOVENTIL EFFECT IN CLUSTERED HETERO STRUCTURE

*V. A. Drozdov, M. A. Drozdov, V. V. Koval'chuk*

The presented work is devoted research of physical properties of Si clusters (C), deployed in the interface of hetero transition matrix on the basis of Si and  $Cu_2S$ . Found out the row of perspective in a practical plan effects, inherent this system and depending on sizes clusters. In particular, information is presented about anomalous spectral inverse photo effect (SPE), characteristic for heterojunction of  $pCu_2S-C-nSi$  at cluster sizes  $<10 \text{ \AA}$ . The mechanism of SPE was proposed.

**Keywords:** heterojunction, cluster, anomalous photo ventil effect.

В настоящей работе поставлена задача исследования гетероперехода (ГП)  $pCu_2S-nSi$ , который может быть использован в сенсорной электронике, оптоэлектронике и разработке фотопереходных элементов (ФПЭ). ГП  $pCu_2S-nSi$  (при микронных толщинах слоя сернистой меди) выполнялся в полупленочном варианте термической возгонкой в вакууме  $\sim 10^{-6}$  Тор порошка сернистой меди марки “ЧДА” на оптически совершенную грань (111) кристалла кремния  $n$ -типа, легированного фосфором, с удельным сопротивлением  $\sim 0,01$  Ом·см. Подложка перед напылением сернистой меди протравливалась в полирующем травителе СР — 4А. В качестве омических контактов к сернистой меди использовалось олово, со стороны кремния — сплав серебра с сурьмой (20 %).

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что морфология гетероструктуры зависит от условий напыления. Изменяя температуру кремниевой подложки от комнатной до  $\sim 400$  °С, можно было осуществлять различные структурные состояния в пленке сернистой меди: от  $\alpha Cu_2S$  — орторомбической фазы до  $\beta Cu_2S$  — гексагональной. В связи с этим следовало подобрать такие условия напыления пленок  $Cu_2S$ , при которых энергетический профиль ГП обеспечивал бы наилучшие условия для реализации его функциональных возможностей. По этой причине при разработке лабораторной технологии получения пленок  $Cu_2S$  авторы сочли целесообразным включить исследование стехиометрии сернистой меди по рентгеновскому эмиссионному спектру меди в составе соединения меди и серы. Такой анализ обычно проводится при определении состава включений и фаз в сплавах. По ряду эталонов [1] с известным содержанием меди строился градуировочный график, на основании которого в совокупности с зависимостью фоточувствительности ГП  $pCu_2S-nSi$  от температуры подложки при наращивании слоя  $Cu_2S$ , была установлена область оптимальных составов пленки сернистой меди (рис. 1).

Предпочтительной в контексте последующего изложения является  $\alpha$ -фаза  $Cu_2S$ , отличающаяся по величине постоянной кристаллической решетки от кремния лишь во втором знаке после запятой. Наличие линий Кикучи на электронограммах  $Cu_2S$ -пленок подтверждают высокую степень их совершенства.

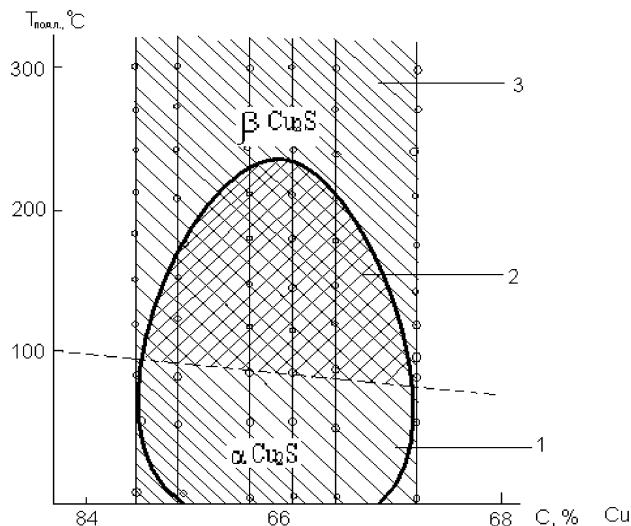


Рис. 1. Зависимость стехиометрии и состава пленок  $Cu_2S$  от температуры подложки ( $T_{подл.}$ ) и области различной фоточувствительности ГП  $pCu_2S-nSi$  (1 — низкая фоточувствительность, 2 — максимальная, 3 — средняя)

По результатам справочных [1], электрофизических, оптических и фотоэлектрических измерений предлагается зонно-энергетическая диаграмма  $pCu_2S-nSi$ -гетероперехода, представленная на рис. 2. Можно утверждать, что эта система имеет хорошие перспективы в разработке фотоэлектрических преобразователей энергии.

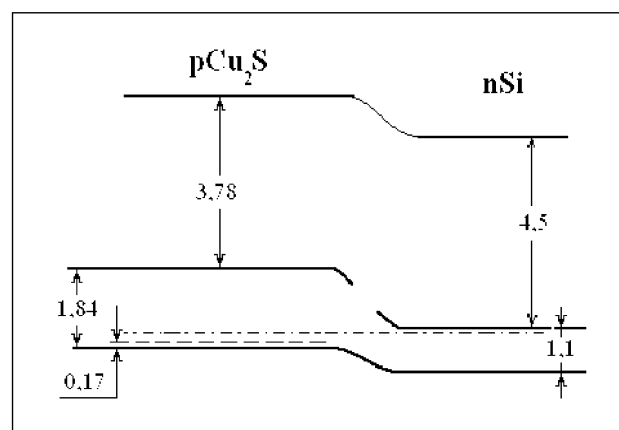


Рис. 2. Зонная диаграмма  $pCu_2S-nSi$ -гетероперехода (числа соответствуют электронвольтам)

Важным элементом СФЭ-версии исследуемой гетеросистемы является кластерный растр в интерфейсе, при этом, с учетом экстенсивности физических свойств кластеров [2], особое значение имеет степень их диспергирования. При размерах кластеров  $< 10$  Å  $Cu_2S-K-nSi$  — элемент действует в режиме цветоинверсии фотопереходного эффекта (СФЭ),

сущность которого иллюстрирует рис. 3. В активной области спектра нормальный фотопереход соседствует с аномальным. Операция кластеризации гетероперехода производилась по методу [3].

Природа СФЭ связана с сочетанием в одном гетеропереходе двух существенно различных, спектрально разделённых механизмов вентильного фотоэффекта. Первый из них реализует тривиальную схему вентильного фотоэффекта в p-n-переходе (рис. 3 а), когда n-область при освещении заряжается отрицательно. Во втором случае срабатывает кластеризованный интерфейс, создающий аномальный фотопереходный эффект (рис. 3 б).

По своей сути механизм фотопереходного эффекта на кластерах, по-видимому, стоит ближе всего к схеме, которая в английской литературе получила название “feed in — feed out”. Такое предположение вытекает из анализа околокластерной энергоситуации, которую можно определить с учётом конкретных условий в гетеропереходе следующим образом (рис. 4).

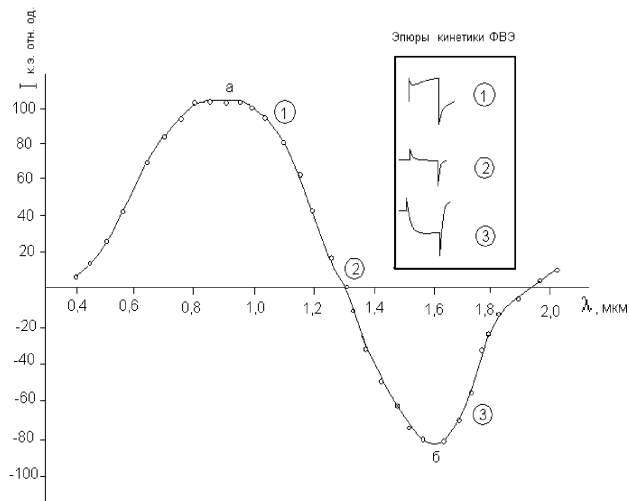


Рис. 3. Спектральное распределение СФЭ: а — область обычного эффекта, б — аномального; 1 — кинетика фотоответа в области обычного эффекта, 2 — в точке инверсии, 3 — в области аномального эффекта

Фотовозбужденный электрон срывается с кластера вглубь пленки сернистой меди и улавливается сильно развитой в этом монополярном полупроводнике системой уровней прилипания для электронов. Одновременно с фотовозбуждением первого электрона в кластер туннелирует другой — из валентной зоны кремния и т.д.

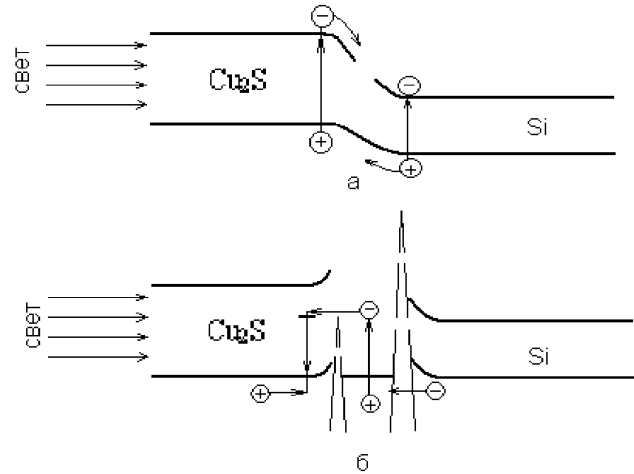


Рис. 4. Зонные энергетические диаграммы некластеризованного (а) и кластеризованного (б) участков ГП

Необходимое для туннелирования энергетическое сопряжение кластера с валентной зоной кремния обеспечивается характерным для мелких кластеров электронно-конформационным взаимодействием (ЭКВ). В силу специфической экстенсивности кластерных свойств энергосистема кластера оказывается весьма чувствительной к взаимодействию с электронами.

Если моделировать кластер потенциальной квантовой ямой (ПКЯ), то ситуация реализуется так как иллюстрирует рис. 5. Стенки ящика в первоначальном состоянии неподвижны и уравновешены внешними силами (т.е. кластер находится в твердотельной матрице). Фотовозбуждение может изменить состояние электрона. Если квантовое число электрона  $n$  мгновенно возрастает до  $n' = n + \Delta n$ , то увеличивается и сила, которая давит на стенки ящика. Равновесие нарушается, стенка перемещается и приходит к равновесию, сдвинувшись на расстояние  $\Delta L = L' - L$ . Соответствующая работа  $W$  равна:

$$W = \frac{\hbar^2}{4m} \left( \frac{n'^2}{L'^2} - \frac{n^2}{L^2} \right), \quad (1)$$

где  $m$  — масса электрона,  $\hbar$  — постоянная Планка,  $L$  и  $L'$  — ширина ящика до и после возбуждения электрона,  $n$  и  $n'$  — главное квантовое число основного и возбужденного состояний соответственно.

Вслед за сдвигом стенки понижается электронная энергия. Таким образом, изменение электронного состояния кластера меняет его конформацию, электронная энергия частично превращается в конформационную.

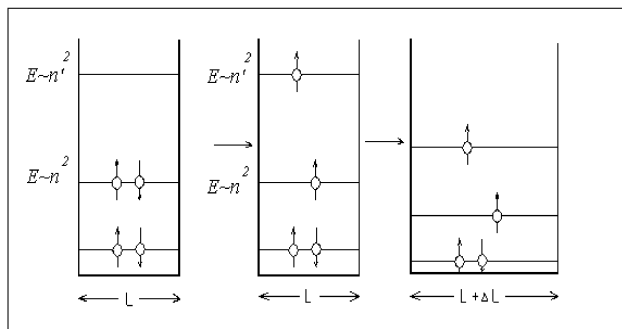


Рис. 5. Схема ЭКВ (пояснение в тексте)

Именно понижение электронной энергии сопрягает энергосистему кластера с V-зоной кремния и электронными ловушками в сернистой меди. В результате инверсируется механизм фотовентильного эффекта в гетеропереходе — с типичного “p-n-переходного” на “ЭКВ-туннельный”.

Таким образом, фотовентильный эффект, проявляющийся в ГП  $\text{Cu}_2\text{S-nSi}$  может быть

объяснен с применением кластерного подхода, а  $\text{Cu}_2\text{S-K-nSi}$  действует как элемент в режиме цветоинверсии. В активной области спектра нормальный фотовентильный эффект соседствует с аномальным

Авторы выражают благодарность проф. М. Ватанабе за предоставленные образцы K-Si.

### Литература

1. Фоменко В.С., Подчерняева И.А. Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов. Справочник // Под ред. чл. — корр. АН УССР Г.В. Самсонова. М.: Атомиздат, 1975. — 321 с.
2. Дроздов В.А., Ковальчук В.В. Электронні процеси в наноструктурах с субфазим кремнієм // Журнал фізичних досліджень. — 2003. — т.7, № 4. — С393-401.
3. Watanabe M.O., Kanayama T. Growth and transport of structure-controlled hydrogenated Si clusters for deposition on solid surface // Appl. Phys. A. — 1998. — v.66. — p.S1039-S1042.