

Оптическая память гетероструктуры $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$

© Ю.А. Никольский[†]

Борисоглебский государственный педагогический институт,
397160 Борисоглебск, Россия

(Получена 18 сентября 2000 г. Принята к печати 7 февраля 2002 г.)

В гетероструктуре $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$ легко реализуются необходимые условия для существования оптической памяти — наличие потенциальных барьеров и глубоких ловушек. Коэффициент памяти, измеренный на прямой ветви вольт-амперной характеристики, составляет максимальную величину $\sim 10^4$. Гетероструктуру можно использовать как оптоэлектронную ячейку памяти, способную не только запоминать сигналы, но и суммировать их.

Явление оптической памяти в полупроводниках в большинстве случаев вызвано наличием неоднородностей, приводящих к образованию коллективных потенциальных барьеров [1]. Электрическое поле на барьере вызывает пространственное разделение неравновесных носителей: электронам для попадания в области пространства, содержащие дырки, (и наоборот) необходимо преодолеть потенциальный барьер, называемый рекомбинационным (E_r). Вследствие этого наблюдаются аномально большие времена жизни неравновесных носителей, достигающие 10^5 с.

Кроме рекомбинационных барьеров для существования долговременных релаксаций и остаточной проводимости необходимо, чтобы генерируемые светом неравновесные носители могли участвовать в переносе заряда в полупроводнике, т.е. наряду с барьерами должны существовать низкоомные проводящие области. Эти области соединены между собой „перевалами“ или так называемыми дрейфовыми барьерами (E_d), которые всегда меньше рекомбинационных.

Таким образом, электронам для рекомбинации необходимо преодолеть барьер E_r , а для участия в проводимости — барьер E_d . Потенциальный рельеф в полупроводниках обычно связан с хаотическими неоднородностями, т.е. со статистическим характером распределения примесей, в результате чего трудно получить воспроизводимые результаты на образцах, изготовленных по одинаковой технологии из одного и того же материала.

В связи с этим исследуются структуры с искусственно созданным потенциальным рельефом. Особенно интересны гетероструктуры, когда они образованы материалами с большим несоответствием кристаллических решеток. К таким гетероструктурам как раз относится структура полупроводник-диэлектрик-полупроводник $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$.

Цель настоящей работы заключается в изучении гетероструктуры $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$ с точки зрения создания эффективных ячеек оптической памяти.

Гетероструктура $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$ формировалась путем напыления дискретным испарением в вакууме при остаточном давлении 10^{-5} мм рт.ст. пленки антимионда индия n -типа проводимости толщиной 0.5–1.0 мкм

на подложку из окисленного кремния при температуре $\sim 300^\circ\text{C}$. Пленки $n\text{-InSb}$ имели поликристаллическую структуру с размером кристаллов ~ 0.5 мкм, концентрацию носителей заряда $n = (2-5) \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ и подвижность $u = (5-8) \cdot 10^3$ см 2 /В·с при комнатной температуре. Концентрация носителей заряда в $p\text{-Si}$ составляла $\sim 10^{15}$ см $^{-3}$ при комнатной температуре.

Для измерения вольт-амперных характеристик к пленке $n\text{-InSb}$ и к подложке $p\text{-Si}$ эвтектическим сплавом In-Sn припаивались тонкие медные проволочки. Освещение поверхности пленки $n\text{-InSb}$ осуществлялось от лампы накаливания в диапазоне освещенностей 200–2000 лк.

Установлено, что как при комнатной температуре, так и при 77 К для всех ветвей темновых и световых вольт-амперных характеристик (ВАХ) зависимость тока через гетероструктуру от напряжения смещения $I(V)$ носит экспоненциальный характер и представляется эмпирической зависимостью

$$I = I_{s0} \exp(T/T_0) \exp(V/V_0), \quad (1)$$

где I_{s0} , T_0 , V_0 — константы. Поэтому механизм токопрохождения через гетероструктуру, скорее всего, туннельный.

Проведенные исследования оптической памяти поликристаллических пленок $n\text{-InSb}$, выращенных на диэлектрических подложках из слюды и окисленного кремния, показали, что эффект оптической памяти в таких пленках составляет не более 5–7% при температуре жидкого азота. Эффект оптической памяти в гетероструктуре $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$ при тех же условиях достигает $\sim 40\%$, что позволяет связать его с наличием потенциальных барьеров и глубоких ловушек за счет большого несоответствия постоянных решеток компонентов, составляющих гетероструктуру $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$, когда у поверхности раздела в области объемного заряда образуется большое количество дефектов. Толщина слоя SiO_2 , определенная эллипсометрическим методом, равна 17–25 Å, что и объясняет его туннельную прозрачность.

Рассмотрим вольт-амперные характеристики, снятые при 77 К под действием внешнего освещения и после его выключения (рис. 1). При стационарном воздействии интегральным излучением как прямой, так и обратный

[†] E-mail: bgpi@mail.ru
Fax: (07354)62601

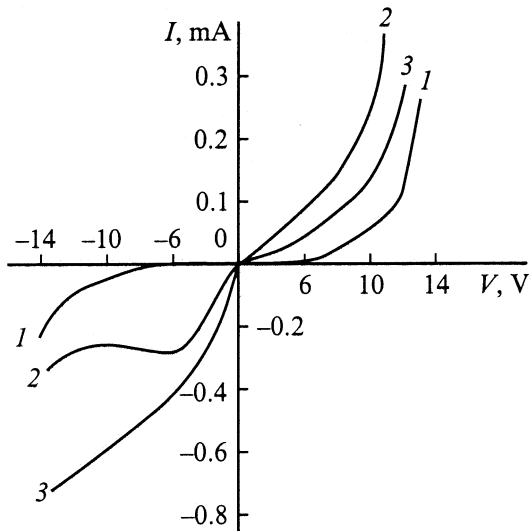


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики гетероструктуры $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$ при 77 К: 1 — темновая, 2 — при освещении, 3 — памяти.

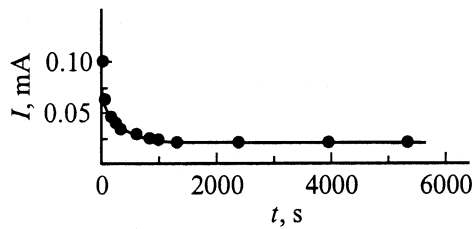


Рис. 2. Кривая релаксации остаточной проводимости гетероструктуры $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$.

токи возрастают от темновых значений (кривая 1) до значений I_1 (кривая 2). После снятия возбуждения прямой и обратный токи не возвращаются к своему первоначальному темновому значению, а устанавливается новый ток, который назовем током памяти I_m (кривая 3), несколько меньший I_1 и значительно превосходящий темновой I_0 . Коэффициент памяти α_m , равный отношению тока памяти к темновому, при одинаковых значениях знака и величины напряжения смещения V , освещенности E и длительности экспозиции t составляет максимальную величину 10^4 для прямой ветви ВАХ. С увеличением напряжения α_m растет, а затем начинает резко уменьшаться в связи с ростом темнового тока. Возвращение гетероструктуры, находящейся в состоянии остаточной проводимости, к исходному состоянию осуществляется подачей импульса обратного напряжения до 20 В длительностью в несколько миллисекунд. Такое „стирание“ памяти объясняется полевым гашением остаточной проводимости.

В случае системы, описываемой двухбарьерной моделью, закон затухания остаточной проводимости имеет вид [2]

$$I_0/I_{m1} = (1 + \alpha t)^\nu, \quad (2)$$

где I_0 — ток через гетероструктуру в отсутствие светового возбуждения, т.е. в момент времени $t = 0$,

I_{m1} — ток памяти в момент времени t , α — константа, определяемая температурой и высотой рекомбинационного барьера при $t = 0$; ν — константа, зависящая от соотношения высот дрейфового и рекомбинационного барьеров, $\nu < 1$.

Значение α , согласно [2], определяется по экспериментальным зависимостям $\lg(I_0/I_{m1}) \propto \nu \alpha t$ и $\lg(I_0/I_{m1}) \propto \text{tg}(\alpha t)$ для предельных случаев $\alpha t \ll 1$ и $\alpha t \gg 1$ соответственно. Используя кривую релаксации (рис. 2) и исключив из рассмотрения начальный участок, определяемый обычными процессами, не связанными с остаточной проводимостью, получим значение $\alpha = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Подставив это значение в (2) и построив зависимость

$$\lg(I_0/I_{m1}) = f[\lg(1 + \alpha t)], \quad (3)$$

определим $\nu = 0.25$. Это значение удовлетворяет и ограничению $E_d/E_r < 0.5$, полученному в [3]. Величина тока остаточной проводимости зависит от освещенности образца. На рис. 3 представлена прямая ветвь ВАХ гетероструктуры, которая снималась при помещении образца в жидкий азот в темноте (кривая 1). Затем образец в течение 10 с облучался белым светом освещенностью 200 лк. Затем свет выключался и через 10 мин снималась зависимость тока остаточной проводимости от напряжения (кривая 2). Подачей импульса напряжения стирания гетероструктура возвращалась в исходное состояние. Измерения вновь повторялись при различных интенсивностях освещения.

Необходимо отметить, что любое промежуточное значение тока памяти (рис. 3, кривые 1–4) получается и при неизменной интенсивности освещения образца, но при изменении времени экспозиции. Если образец после первого освещения не возвращать в исходное состояние, а освещать новым импульсом света, то ток памяти от своего первоначального значения I_{m1} возрастает до нового значения I_{m2} , и это продолжается до тех пор, пока

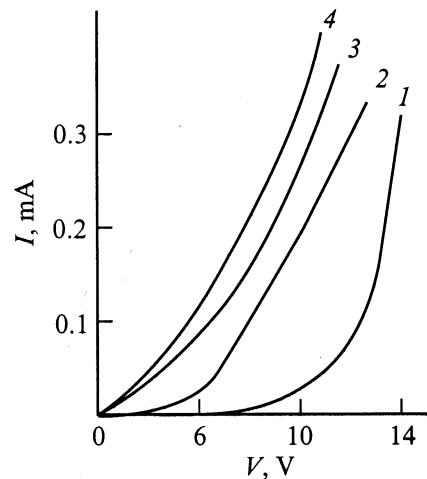


Рис. 3. Прямые ветви вольт-амперных характеристик. 1 — ток в темноте; (2–4) — токи остаточной проводимости гетероструктуры в результате воздействия светом с $E = 200, 1000, 2000$ лк соответственно.

ток остаточной проводимости не достигнет некоторой максимальной величины. Таким образом, исследуемая гетероструктура обладает свойством интегрирования эффекта от излучения, падающего на образец.

Описанные эффекты обусловлены, по-видимому, наличием глубоких поверхностных уровней в области объемного заряда исследуемой гетероструктуры. Согласно [4], носители тока, освобожденные под действием света с этих уровней, могут дать вклад в проводимость, сохраняющийся достаточно долго. Это происходит вследствие того, что рекомбинации носителей препятствует потенциальный барьер, увеличивающийся по мере захвата электронов на поверхностные состояния. При этом, в отличие от однородного полупроводника, у которого потенциальный барьер вызван только зарядом на поверхностных состояниях, в случае гетероструктуры он увеличивается дополнительно за счет разности работ выхода контактирующих материалов. В силу этой причины явление памяти в гетероструктуре выражено более ярко.

Эти результаты показывают, что гетероструктура $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$ может быть использована в качестве элемента оптической памяти. Наличие согласованных спектральных характеристик при изготовлении источника света и фотоприемника из одного и того же материала открывает хорошие перспективы их применения в оптоэлектронике, а в дальнейшем — и интегральной оптике.

Из рис. 3 видно, что каждый новый световой импульс, попадающий на гетероструктуру, увеличивает ток остаточной проводимости, т.е. исследуемая гетероструктура суммирует поступающую на ее вход информацию. Как показано выше, ток остаточной проводимости обусловлен неравновесными носителями, исчезновение которых затруднено из-за наличия рекомбинационного барьера. Каждый последующий световой импульс увеличивает концентрацию неравновесных носителей и, следовательно, ток остаточной проводимости. Очевидно, рост концентрации пространственно разделенных носителей будет продолжаться до некоторого максимального значения тока остаточной проводимости, так как разделение носителей создает электрические поля, которые компенсируют поля, образованные неоднородностями. Благодаря этому амплитуда потенциального барьера и, следовательно, величины E_r , E_d будут уменьшаться, что облегчит рекомбинацию разделенных носителей. В результате установившегося динамического равновесия определяется максимально возможная величина остаточного тока. В нашем случае она на 3–4 порядка превышала значение темного тока.

Таким образом, меняя интенсивность освещения, можно переводить образец в любое состояние, находящееся между темновым током и максимальным током остаточной проводимости, и гетероструктуру $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$ можно использовать как оптоэлектрическую ячейку памяти, способную не только запоминать сигналы, но и суммировать их. Кроме того, особенностью данной ячейки является возможность регистрировать сигналы без приложения внешнего напряжения, которое необходимо лишь при считывании информации; ячейка может

регистрировать оптическую информацию, лежащую в пределах спектральной фоточувствительности материалов, образующих гетероструктуру.

Сравнивая функциональные возможности данного элемента оптической памяти с другими известными приборами этого типа, можно отметить его высокую чувствительность в инфракрасной области спектра (эффект оптической памяти $\sim 40\%$).

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Наблюдается ярко выраженный эффект оптической памяти в гетероструктуре $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$, связанный с наличием потенциальных барьеров и глубоких ловушек, обусловленных большим несоответствием кристаллических решеток компонентов.

2. Элемент оптической памяти на основе рассматриваемой гетероструктуры имеет высокую чувствительность в инфракрасной области спектра при эффекте оптической памяти $\sim 40\%$.

Список литературы

- [1] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. ФТП, **10**, 209 (1976).
- [2] В.Б. Сандомирский, А.Г. Ждан, М.А. Мессерер, И.Б. Гуляев. ФТП, **7**, 1314 (1973).
- [3] А.Я. Шик. ЖЭТФ, **68**, 1859 (1975).
- [4] М.К. Шейнкман, И.В. Маркевич, В.А. Хвостов. ФТП, **5**, 1904 (1971).

Редактор Л.В. Шаронова

The optical memory in a $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$ heterostructure

Yu.A. Nikol'sky

The State Pedagogical Institute,
397160 Borisoglebsk, Russia

Abstract Conditions required for the optical memory existence are easily realized in a $n\text{-InSb-SiO}_2\text{-}p\text{-Si}$ heterostructure. These are the presence of potential barriers and deep traps. It is established from the voltage-current characteristics that the memory coefficient has the maximum value of 10^4 for the forward current. This heterostructure may be used as an optoelectronic cell, which is able not only to remember the signals but also to summarize them.