

06;07;12

## Оптический видикон на основе слоистой полупроводниковой структуры: считывание и запоминание изображения

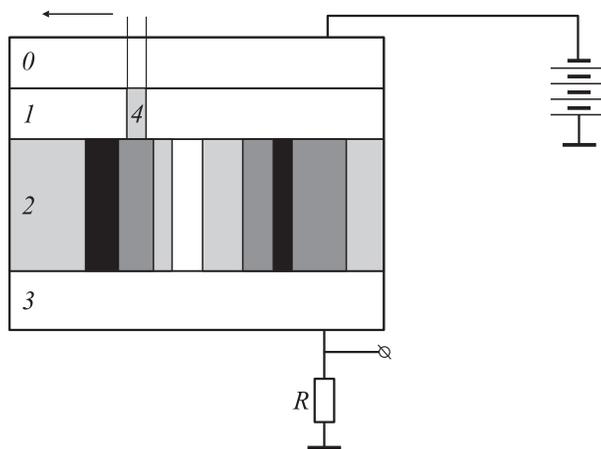
© Г.Г. Козлов,<sup>1</sup> Ю.К. Долгих,<sup>1</sup> Ю.П. Ефимов,<sup>1</sup> С.А. Елисеев,<sup>1</sup> В.В. Овсянкин,<sup>1</sup> В.В. Петров<sup>2</sup><sup>1</sup> Всероссийский научный центр „Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова“, 199034 Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт физики им. В.А. Фока, 198904 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: gkozlov@photonics.phys.spbu.ru

(Поступило в Редакцию 7 мая 2003 г. В окончательной редакции 11 сентября 2003 г.)

Предложено простое устройство для сканирования и запоминания изображения на основе слоистой полупроводниковой структуры. Считывание при сканировании и запоминании производится лазерным лучом. Видеосигналом при считывании является фотоэдс, генерируемая структурой. Приведены простые эксперименты, демонстрирующие работоспособность предлагаемой структуры как видикона и запоминающего устройства, способного сохранять информацию по крайней мере 2 h. Приведена физическая интерпретация наблюдаемых эффектов.

### Описание устройства

Целью настоящей работы является описание устройства для сканирования изображения, подобного телевизионному видикону, в котором электронный луч заменен оптическим. Схема предлагаемого устройства приведена на рис. 1. На проводящую подложку 3 наносятся два диэлектрических слоя 1 и 2, причем слой 2 имеет запрещенную зону уже, чем слой 1. Со стороны широкозонного слоя 1 наносится прозрачный проводящий слой 0 — прозрачный электрод. Описанная структура последовательно с сопротивлением нагрузки  $R$  подключается к источнику питания (рис. 1). Со стороны прозрачного электрода спроецируем на эту структуру изображение



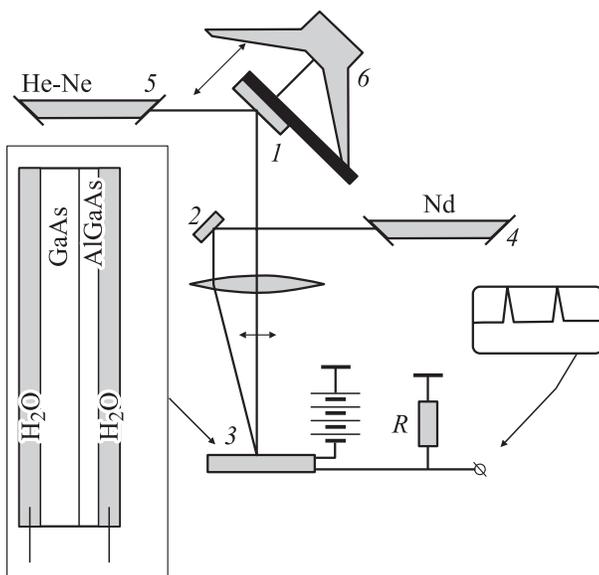
**Рис. 1.** Принципиальная схема оптического видикона: 0 — прозрачный проводящий слой; 1 — широкозонный диэлектрик; 2 — узкозонный диэлектрик, непрозрачный для изображения, светлыми и темными полосами показано распределение яркости и связанное с ним распределение фотопроводимости; 3 — проводящая подложка; 4 — проводящая область, создаваемая коротковолновым читающим лучом, замыкающая цепь.

в спектральном интервале, в котором широкозонный слой 1 прозрачен, а узкозонный слой 2 поглощает. При этом в узкозонном слое 2 возникнет распределение фотопроводимости, повторяющее распределение темных и светлых мест изображения (рис. 1). Изображение не меняет проводимости слоя 1 (прозрачного для изображения), который остается изолирующим, и, следовательно, ток в цепи отсутствует. Направим теперь на структуру остро сфокусированный луч, достаточно коротковолновый, чтобы создать фотопроводимость в широкозонном слое 1. При этом в том месте структуры, куда попал этот луч, возникнет небольшая проводящая область 4 в слое 1 и в цепи появится ток, величина которого будет зависеть от проводимости слоя 2 в этом месте, т.е. от локальной яркости изображения. Если теперь сканировать положение коротковолнового луча по поверхности структуры, то на сопротивление  $R$  возникнет видеосигнал, соответствующий изображению. По этой причине сфокусированный коротковолновый луч назовем читающим. Читающий луч, разумеется, проникнет и в слой 2 и изменит его проводимость, что создаст фоновый фототок даже в совершенно „черных“ местах изображения. Этот эффект можно сделать малым если выбрать материал слоя 1 таким, что читающий луч, вызывая появление проводимости в слое 1, поглощался бы им настолько, что вызванное им изменение проводимости слоя 2 было бы незначительно. Слой 2 следует сделать таким, чтобы читающий луч поглощался им полностью на расстояниях, меньших, чем длина слоя 2. Описанное устройство и назовем оптическим видиконном. Заметим здесь, что видеосигнал можно получить регистрируя фотопроводимость и одного слоя, на который спроецировано изображение. Благодаря нелинейной зависимости фотопроводимости от интенсивности света фототок будет изменяться при сканировании читающего луча.

## Экспериментальная иллюстрация

Для грубой проверки приведенных выше соображений был поставлен опыт, схема которого приведена на рис. 2. Конкретная схема описанного выше устройства приведена на вставке к рис. 2. Прозрачным электродом  $O$  (обозначения рис. 1) служил водяной слой. Эпитаксиальный слой  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$  (ширина запрещенной зоны  $\sim 1.9\text{ eV}$ ) толщиной  $3\ \mu\text{m}$  и полуизолирующая подложка из  $\text{GaAs}$  толщиной  $300\ \mu\text{m}$  играли роли широкозонного  $1$  и узкозонного  $2$  слоев соответственно. В качестве проводящей подложки  $3$  мы также использовали водяной электрод. Читающим лучом служил сфокусированный луч гелий-неонового ( $\text{HeNe}$ ) лазера, который падал на устройство  $3$  (рис. 2) после прохождения через простейшую отклоняющую систему, состоящую из зеркала  $1$ , соединенного с диффузором громкоговорителя. При колебании диффузора читающий луч двигался вдоль отрезка в плоскости устройства  $3$ . В качестве „изображения“ мы использовали световое пятно, создаваемое сфокусированным лучом неодимового лазера ( $1.06\ \mu\text{m}$ ) в плоскости устройства  $3$ . Меняя положение этого пятна при помощи зеркала  $2$ , можно было поместить его на траекторию читающего луча. При этом в цепи возникали импульсы тока. Заметим, что, несмотря на то, что  $\text{GaAs}$  прозрачен для излучения неодимового лазера, фотопроводимость в нем возникает благодаря примесям и внутренним дефектам.

Описанный простой эксперимент лишь иллюстрирует общие соображения, положенные в основу работы оп-



**Рис. 2.** Демонстрационная установка. На вставке слева — схема видикона  $3$ . Источник читающего луча —  $\text{HeNe}$  лазер  $5$ , сканирование производится зеркалом  $1$ , укрепленным на громкоговорителе  $6$ . В качестве изображения используется световое пятно, создаваемое неодимовым лазером  $4$ . При помощи зеркала  $2$  его можно поместить на отрезок, вдоль которого двигается читающий луч при сканировании.

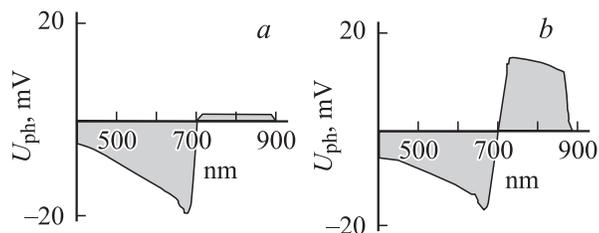
тического видикона. Ниже мы увидим, что описанная выше картина протекания тока в системе из двух слоев является неточной и, скорее, наводящей. Если слои достаточно тонкие, их нельзя представить как составное сопротивление, поскольку картина движения зарядов в них более сложная. Вместе с тем следует ожидать, что пространственное разрешение оптического видикона будет увеличиваться при использовании тонких слоев.

В следующих разделах мы опишем эксперименты с тонкими слоями и их качественную интерпретацию.

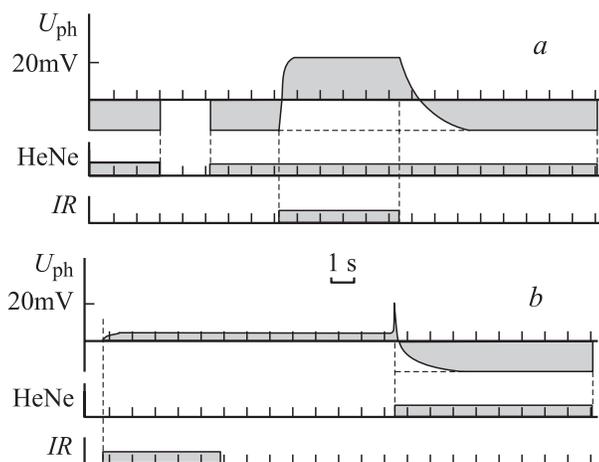
## Эксперименты с тонкими слоями

Для дальнейших экспериментов была изготовлена следующая структура. На  $n$ -легированной ( $\sim 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ) подложке из  $\text{GaAs}$  (проводящая подложка  $3$  на рис. 1) методом молекулярной пучковой эпитаксии был выращен слой  $\text{GaAs}$  толщиной  $1\ \mu\text{m}$  (узкозонный слой  $2$ ) и на нем — слой  $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$  такой же толщины (широкозонный слой  $1$ ). Рост указанных слоев производился непосредственно на подложке  $n$ - $\text{GaAs}$  без развязывающей сверхрешетки при температуре  $600^\circ\text{C}$ . Поверх эпитаксиальных слоев был напылен прозрачный проводящий слой окиси олова  $\text{SnO}$  (прозрачный электрод  $O$ ). Первые пробные эксперименты с этой структурой показали, что при ее облучении в ней возникает электродвижущая сила (эдс) и что дополнительный внешний источник, включенный в цепь структуры, не приводит к существенным эффектам. По этой причине дальнейшие эксперименты проводились без внешнего источника и представляли собой измерение фотоэдс при различных условиях облучения. Все эксперименты проводились при комнатной температуре. Во всех случаях структура облучалась со стороны прозрачного электрода. Ниже в этом разделе мы приводим результаты экспериментов с описанной выше структурой. Качественная интерпретация этих экспериментов будет приведена в следующем разделе.

а) Измерение спектра фотоэдс. Модулированное с частотой  $\sim 30\text{ Hz}$  излучение лампы накаливания, пропущенное через монохроматор, падало со стороны прозрачного электрода на структуру, замкнутую на сопротивление  $500\text{ k}\Omega$ . Сигнал фотоэдс с этого сопротивления записывался как функция длины волны падающего света (рис. 3, *a*). Затем на структуру, кроме света из монохроматора, направлялось непрерывное излучение  $\text{HeNe}$  лазера (ослабленное до плотности  $\sim 100\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) и вновь записывался спектр фотоэдс (точнее, изменение фотоэдс, связанное с модулированным светом из монохроматора) (рис. 3, *b*). Видно, что без засветки  $\text{HeNe}$  лазером, фотоэдс резко уменьшается и меняет знак при длинах волн, больших  $700\text{ nm}$  (что примерно соответствует ширине запрещенной зоны  $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ ), и практически полностью исчезает при длинах волн, больших  $870\text{ nm}$  — ширине запрещенной зоны  $\text{GaAs}$  при комнатной температуре. Засветка  $\text{HeNe}$  лазером



**Рис. 3.** Спектральная зависимость фотоэдс  $U_{ph}$  без подсветки HeNe (*a*), при подсветке HeNe лазером (*b*).



**Рис. 4.** Кинетика фотоэдс при совместной ИК засветке и подсветке HeNe лазером.  $U_{ph}$  — фотоэдс, HeNe — подсветка HeNe лазером, IR — ИК засветка.

увеличивает сигнал фотоэдс в области 700–870 nm. Знак фотоэдс при длинах волн облучающего света меньше 700 nm: „-“ — на прозрачном электроде, „+“ — на подложке с последующим изменением знака в интервале 700–870 nm.

б) Измерение фотоэдс при совместном облучении HeNe лазером и инфракрасной подсветке. В первом из этих экспериментов структура сперва освещалась HeNe лазером ( $\sim 50 \mu W$  при площади пятна  $\sim 0.5 \text{ cm}^2$ ), причем на ней возникала фотоэдс: „-“ — на прозрачном электроде, „+“ — на подложке. Затем включалась инфракрасная подсветка (ИК подсветка), создаваемая лампочкой накаливания с фильтром, пропускающим свет с длинами волн большими 900 nm. При этом фотоэдс меняла знак: „+“ становился на прозрачном электроде. После выключения ИК подсветки фотоэдс медленно (примерно в течение 1–2 s) возвращалась к прежнему значению, соответствующему облучению только HeNe лазером (рис. 4, *a*). Время возврата увеличивалось при уменьшении интенсивности HeNe лазера.

Второй эксперимент заключался в следующем. При выключенной подсветке HeNe лазером на некоторое время ( $\sim 5$  s) включалась ИК подсветка. При этом большого фотоотклика не наблюдалось (рис. 4, *b*). Затем

ИК подсветка выключалась и через 3–5 s включался HeNe лазер и наблюдалась временная динамика фотоэдс. Последняя была качественно такой же, как и в предыдущем опыте: „+“ — на прозрачном электроде убывал и, пройдя через нуль, фотоэдс выходила на значение, соответствующее засветке только HeNe лазером (рис. 4, *b*). Таким образом, ИК подсветка создавала в структуре долгоживущее электрическое поле, которое разрушалось светом HeNe лазера. Знак этого поля противоположен знаку поля, связанного с фотоэдс, возникающей под действием излучения HeNe лазера.

в) Эксперименты по сканированию и запоминанию изображения. Первый из описанных экспериментов показывает, что рассматриваемую структуру можно использовать для сканирования изображения по схеме, описанной в начале. Из спектров фотоэдс (рис. 3, *a, b*) видно, что в интервале длин волн 700–870 nm подсветка HeNe лазера „разрешает“ соответствующую фотоэдс. Эксперимент по сканированию изображения проводился по схеме рис. 2, из которой были исключены источник питания и неодимовый лазер. Изображение волоска лампочки накаливания создавалось в плоскости структуры с помощью линзы. Когда луч HeNe лазера пересекал изображения волоска, на сопротивление нагрузки возникал импульс фотоэдс, связанный с совместным действием изображения и читающего луча HeNe лазера.

Второй из описанных экспериментов показывает, что возможно запоминание изображения. Запись изображения производилась следующим образом. HeNe лазер выключался. После этого на структуру проектировалось изображение волоска лампочки накаливания через ИК фильтр, как и во втором эксперименте. Затем лампочка выключалась и структура некоторое время выдерживалась в темноте. После этого изображение считывалось путем включения HeNe лазера. В те моменты, когда его луч проходил через то место, где было изображение волоска, на нагрузке в течение 1–2 s наблюдался импульс фотоэдс, который затухал тем быстрее, чем большей была интенсивность читающего луча HeNe лазера. Эти эксперименты показали, что, если между записью и считыванием структура закрыта от попадания света, изображение может сохраняться по крайней мере 1–2 h.

### Качественная интерпретация

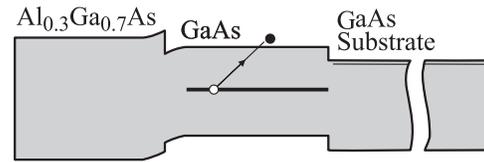
а) Интерпретация экспериментов по измерению спектра фотоэдс. Мы начнем с интерпретации фотоэдс в длинноволновой области 700–900 nm (рис. 3, *a, b*). По нашему мнению, фотоэдс, в этой спектральной области можно объяснить эффектом Дембера [1]. Напомним кратко, в чем состоит этот эффект. Пусть на поверхность полупроводника падает свет с энергией кванта, превосходящей ширину запрещенной зоны материала. Пусть длина поглощения  $L$  этого света

много меньше, чем толщина полупроводника. Таким образом, свет поглощается в слое толщиной  $\sim L$ , в этом слое возникает большое количество электронно-дырочных пар. Электроны и дырки начинают диффундировать в глубь полупроводника. Если коэффициенты диффузии (или, что то же самое, подвижности) электронов и дырок различны, то электроны и дырки будут диффундировать с разной скоростью, произойдет разделение зарядов, возникнет электрическое поле и связанная с ним эдс. Появление этой эдс называют эффектом Дембера. Эдс Дембера тем больше, чем больше разность коэффициентов диффузии электронов и дырок и равна нулю в случае равенства этих коэффициентов.

Обратимся теперь к нашей структуре. При переходе к длинам волн, больши́м  $700\text{ nm}$ , слой  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  становится прозрачным, электронно-дырочные пары возникают только в слое GaAs и фотоэдс Дембера создается только этим слоем. Как известно, подвижность электронов в GaAs выше, чем дырок, поэтому электроны диффундируют в глубь структуры быстрее дырок, в результате чего слой GaAs заряжается положительно со стороны границы с  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ , что и наблюдается на опыте (рис. 3, а). При длинах волн, больши́х  $870\text{ nm}$  (ширина зоны GaAs при комнатной температуре), электронно-дырочные пары не образуются ни в одном из слоев и эдс Дембера не возникает.

Относительно малая величина сигнала при длинах волн, больши́х  $700\text{ nm}$  (рис. 3, а), может быть объяснена следующим образом. Для создания тока во внешней цепи (именно этот ток и измеряется) необходимо не только присутствие внутренних полей в структуре, но и наличие носителей тока во всех слоях структуры. При длинах волн короче  $700\text{ nm}$  (ширина зоны  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ ) такими носителями являются фотовозбужденные электронно-дырочные пары в слое  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  и слое GaAs. При длинах волн, больши́х  $700\text{ nm}$ , электронно-дырочные пары в слое  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  не образуются, а проникновение электронов и дырок в этот слой из слоя GaAs затруднено наличием барьера на границе слоев, связанного с разностью ширины запрещенных зон GaAs и  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ . Таким образом, слой  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  становится изолирующим и ток сигнала резко падает. Включение постоянной коротковолновой подсветки HeNe лазером (рис. 3, б) восстанавливает „проводимость“ слоя  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ , что сопровождается увеличением сигнала.

Вопрос о механизме фотоэдс в области длин волн короче  $700\text{ nm}$  пока остается открытым. В этой спектральной области слой  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  непрозрачен, падающий свет поглощается в первую очередь этим слоем, поэтому естественно предположить, что фотоэдс в этой спектральной области связана с внутренними полями возникающими в слое  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  или на границе со слоем GaAs. Связать фотоэдс в этой спектральной области с эффектом Дембера трудно, так как для объяснения знака эдс следует предположить, что электронная подвижность в слое  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  меньше дырочной,



**Рис. 5.** Качественная зонная схема структуры. Показан барьер на границе эпитаксиального слоя GaAs и легированной подложки GaAs, возникающий вследствие диффузии электронов из *n*-легированной подложки в эпитаксиальный слой. Показаны заполненные глубокие уровни в слое GaAs и движение фотовозбужденных носителей.

что маловероятно. Можно предположить, что фотоэдс в этой спектральной области связана с возможным внутренним полем пространственного заряда на гетерогранице  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ –GaAs, возникающего вследствие неконтролируемого легирования слоев и имеющимся и в отсутствие света. Возникающий при этом потенциальный барьер может иметь такой знак (рис. 5), что указанная граница ведет себя как фотодиод, создающий эдс „минус“ которой находится со стороны прозрачного электрода, в соответствии с экспериментом. При переходе к длинам волн, больши́м  $700\text{ nm}$ , эта эдс подавляется эффектом Дембера в слое GaAs, который возрастает в этой спектральной области, так как слой  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  становится прозрачным и интенсивность света в слое GaAs возрастает.

б) Интерпретация экспериментов по измерению фотоэдс при совместном облучении HeNe лазером и инфракрасной подсветке. Появление фотоэдс при ИК засветке с энергиями кванта, меньшими ширины зоны GaAs, можно связать с возбуждением примеси, имеющей уровни ниже дна зоны проводимости GaAs. Знак этой фотоэдс указывает на то, что это должны быть уровни, заполненные электронами. То обстоятельство, что носители на этих уровнях сохраняются долгое время, свидетельствует о том, что эти уровни достаточно глубокие. Рассмотрим ситуацию, когда примесь, дающая такие уровни, находится в слое GaAs (рис. 5). При включении HeNe лазера на прозрачном электроде в соответствии с предыдущим экспериментом возникает „–“. Излучение HeNe лазера слабо действует на слой GaAs, так как поглощается, во-первых, слоем  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ , во-вторых, самим слоем GaAs, глубина поглощения в *e* раз  $\sim 0.25\text{ }\mu\text{m}$ . Поэтому можно считать, что действие HeNe лазера на примесь в слое GaAs сильно подавлено. ИК подсветка, напротив, беспрепятственно проникает в этот слой и возбуждает глубокую примесь в слое GaAs. Возбуждение этой примеси сопровождается переходами электронов с глубоких уровней в GaAs в зону проводимости. Далее эти электроны будут двигаться преимущественно направо, в глубь структуры, так как движению налево препятствует барьер, связанный с разностью ширины запрещенных зон GaAs и  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  (рис. 5). Таким

образом, слой GaAs будет заряжаться положительно и знак соответствующего вклада фотоэдс будет обратный тому, который создается слоем  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ . Таким образом, при достаточной интенсивности ИК подсветки знак полной фотоэдс на структуре может измениться, что и наблюдается на опыте.

После выключения ИК подсветки глубокая примесь в слое GaAs начинает постепенно разряжаться: опустошенные ИК засветкой уровни этой примеси начинают заселяться электронами из зоны проводимости слоя GaAs. Последние там возникают благодаря облучению HeNe лазером (или любым другим достаточно коротковолновым источником). Поэтому время разрядки глубокой примеси в слое GaAs зависит от интенсивности HeNe лазера и удлиняется с ее понижением, что и наблюдается в эксперименте. Эксперименты по запоминанию изображения свидетельствуют о том, что в отсутствие света разрядка центров может происходить за несколько часов и более.

Во втором эксперименте пункта б предыдущего раздела, по нашему мнению, происходит следующее. На первом этапе, при ИК подсветке, происходит возбуждение глубокой примеси в слое GaAs и возникает внутреннее поле. Значительного тока в цепи, однако, не возникает, так как нет носителей тока — свободных электронов или дырок. При включении HeNe лазера носители появляются, появляется ток, направление которого определяется знаком полной эдс и такое же, как и в предыдущем эксперименте. Такой же будет и динамика разрядки глубоких уровней.

Почему же фотоэдс, связанная с наличием этих глубоких уровней в слое GaAs, не наблюдалась при измерении спектра фотоэдс? Напомним, что в этих экспериментах фотоэдс практически пропадала при облучении светом с длиной волны, большей 870 нм (рис. 3). Из вышеизложенного ясно, что время разрядки глубоких уровней, даже при подсветке HeNe лазером, составляет единицы секунд, а период модуляции света при измерениях рис. 3 составлял 1/30 секунды, поэтому сигнал фотоэдс от глубоких уровней был сильно подавлен.

в) Интерпретация экспериментов по сканированию и запоминанию изображения базируется на приведенных выше рассуждениях и достаточно очевидна. Например, в эксперименте по запоминанию инфракрасное изображение волоска лампочки создает заряженные глубокие центры и локальное электрическое поле в том месте, где яркость изображения значительна. Если после этого структуру выдерживать в темноте, то разрядка центров будет происходить очень медленно, так как центры глубокие, температурное заселение их электронами из валентной зоны маловероятно, а электронов в зоне проводимости мало, так как образец находится в темноте. Во время считывания луч HeNe лазера, попадая в различные места структуры, создает там свободные носители. В тех местах, где есть внутренние поля, это сопровождается появлением тока в цепи структуры. При этом, как было отмечено

выше, происходит ускоренная разрядка примеси, т.е. считывание является разрушающим.

В заключение подчеркнем, что приведенная интерпретация не претендует на окончательное объяснение описанных экспериментов, скорее, она представляет собой совокупность гипотез, для проверки которых необходимо провести дополнительные исследования. Основной целью данной статьи является описание экспериментов по сканированию и запоминанию изображений при помощи описанной выше простой полупроводниковой структуры.

## Список литературы

- [1] Смит Р. Полупроводники. М.: Мир, 1982. 558 с.