

Вольт-амперные характеристики фотоприемников с блокированной прыжковой проводимостью на основе Si:As

© Д.Г. Есаев, С.П. Синица, Е.В. Чернявский

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 6 июля 1998 г. Принята к печати 7 июля 1998 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования вольт-амперных характеристик структур с блокированной прыжковой проводимостью на основе Si:As. Проведен анализ поведения темнового тока в диапазоне температур $T = 7 \div 25$ К, напряжения смещения $-4 \div 4$ В и приведены соображения о механизмах протекания темнового тока. Выработаны рекомендации выбора напряжения смещения на структурах для оптимальной работы в качестве фотоприемника инфракрасного излучения.

Введение

ВІВ-структура (Blocked Impurity Band) была предложена в работе [1] в качестве примесного фотоприемника дальнего инфракрасного (ИК) диапазона, работающего при гелиевых температурах. Основное ее преимущество перед классическим примесным фотоприемником — сочетание высокой квантовой эффективности при высоком уровне легирования фоточувствительного слоя с пониженным уровнем шума, обусловленным наличием блокирующего слоя, — позволило создать матричные фотоприемные устройства (ФПУ), работающие в спектральном диапазоне $0.4 \div 40$ мкм [2,3]. В одиночных ВІВ-структурах, по-видимому, был реализован режим квантового счетчика [4] и достигнута фоточувствительность при длине волны ИК излучения 190 мкм [5].

Тем не менее в научной литературе до настоящего времени отсутствуют систематические экспериментальные данные о поведении темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) ВІВ-структур, позволяющие установить основные процессы, контролирующие протекание темнового тока, и оптимизировать параметры фотоприемников. Так, в работе [1] не указаны температура, при которой были измерены темновые ВАХ, и значения площадей ВІВ-структур. ВАХ темнового тока, приведенная в работе [6], измерена на двух порядках по току и при одной температуре и не может служить основой для анализа. Темновые ВАХ в работе [7] измерены на одном порядке по току и при двух температурах.

Данные, приведенные в работах [8,9], по-видимому, не соответствуют ВІВ-структуре и режимам ее работы в матричном ФПУ. Основной особенностью ВАХ ВІВ-структуры, предсказанной в работе [10], является ее асимметрия, обусловленная асимметрией ВІВ-структуры, и сильная нелинейность, связанная с инжекцией носителей из контактов. Прямые и обратные токи в структурах [8,9], измеренные при напряжении смещения 1 В, отличаются не более чем на порядок, что говорит о слабом эффекте блокировки. Далее будет показано, что отличие в токах может достигать более 6 порядков (рис. 1). Прямое использование структур [8,9] в матричных ФПУ невозможно, так как при тыловой засветке со стороны общего для всех элементов контакта, характер-

ной для гибридного матричного ФПУ, фоточувствительная область закрыта от ИК излучения толстым (400 мкм) сильно поглощающим слоем кремния.

Предельная обнаружительная способность ВІВ-ФПУ, работающего в низкофоновой ситуации, ограничивается либо шумом матричного кремниевого коммутатора, либо шумом, связанным с протеканием темнового тока ВІВ-фотоэлементов матрицы. Величиной темнового тока ВІВ-фотоэлементов определяется и максимальное время интегрирования сигнала, которое можно реализовать в ФПУ с данной накопительной емкостью коммутатора. Учитывая вышесказанное, нами проведено экспериментальное исследование темновых вольт-амперных характеристик ВІВ-структур и представлены полученные результаты.

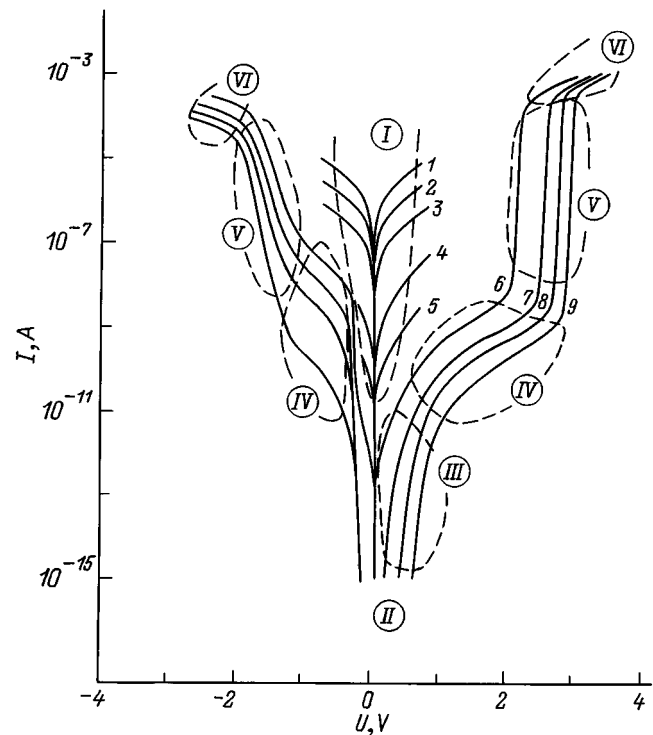


Рис. 1. Семейство вольт-амперных характеристик ВІВ-структуры при температуре T , К: 1 — 24, 2 — 22, 3 — 20.5, 4 — 19, 5 — 17.5, 6 — 15, 7 — 11.6, 8 — 9.7, 9 — 7.4.

Образцы и экспериментальная аппаратура

Для изготовления ВІВ-структур были использованы пластины кремния n -типа диаметром 76 мм с ориентацией поверхности (100) и с удельным сопротивлением 10 Ом·см. ВІВ-структура изготавливалась методом газотранспортной эпитаксии при температуре 1180°C из SiCl_4 с суммарным содержанием примеси менее $10^{-6}\%$ на установке УНЭС-2ПВ. На рис. 2 приведено измеренное методом сопротивления растекания по шаршлифу на установке ARS-100 типичное распределение концентрации атомов мышьяка в эпитаксиальном слое при использовании для легирования смеси арсина с водородом.

Концентрация примеси в фоточувствительном N^+ -слое выбиралась из данных работы [11] по величине оптимального легирования для получения максимального значения квантовой эффективности. В "замурованном" N^{++} -слое концентрация доноров N_d должна достигать величины, при которой уже не наблюдается низкотемпературное вымерзание проводимости и слой становится пригодным для использования его в качестве омического контакта при низких температурах ($N_d > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [1]). Концентрация примеси в блокирующем I -слое определяется из условия понижения прыжковой проводимости до достаточно малых величин и ее значение в изучавшихся структурах ($\cong 10^{15} \text{ см}^{-3}$), определяемое остаточной примесью в технологической установке в данном процессе, этому

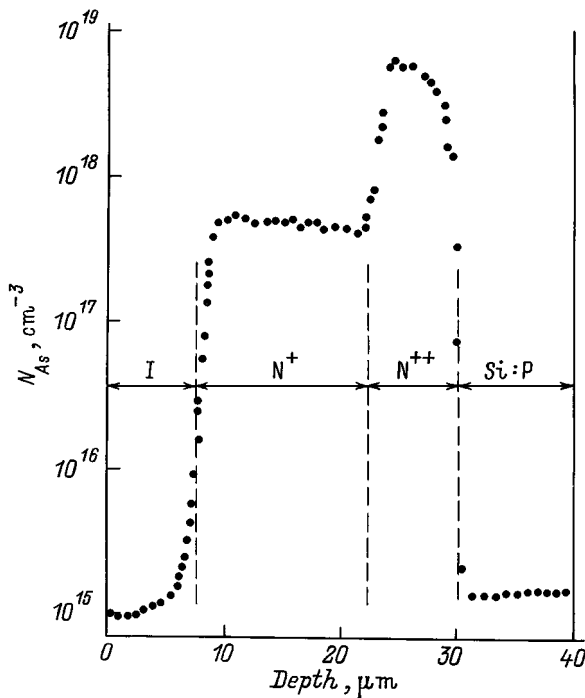


Рис. 2. Распределение концентрации мышьяка N_{As} по глубине слоя в эпитаксиальной ВІВ-структуре.

условию удовлетворяет. Толщины фоточувствительного слоя и блокирующего слоя определяются компромиссом в требованиях к ВІВ-структуре с точки зрения максимальной фоточувствительности и сопряжения с коммутатором. Концентрация компенсирующей примеси в фоточувствительном слое, величина которой принципиально важна для работы ВІВ-структур в качестве фотоприемников, измерялась методом низкотемпературной фотолюминесценции на образцах, полученных в отработанных режимах, но без введения в газовую фазу арсина. Анализ примесного состава показал, что концентрация бора колеблется в пределах $N_B = (2-4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а примесей V группы — $N_P \cong 2 \cdot 10^{13}$, $N_{Sb} \cong 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

После изготовления ВІВ-структур концентрация компенсирующих акцепторов в фоточувствительном слое измерялась методом вольт-фарадных характеристик ($C-V$) при температуре $T = 10 \text{ К}$. Полученная величина $N_a = (2 \pm 1) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ соответствует данным, полученным из метода низкотемпературной фотолюминесценции. "Замурованный" слой выполняет роль общего для всех ВІВ-элементов омического контакта, в котором носители заряда не вымерзают вплоть до 4.2 К. Второй омический контакт к блокирующему слою, индивидуальный для каждого элемента матрицы, расположен на планарной стороне кремниевой пластины и получен путем ионной имплантации фосфора с концентрацией $N_P = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и последующим отжигом.

Образцы ВІВ-структур крепились на медном держателе и охлаждались в транспортном гелиевом дюаре. Конструкция держателя предусматривает минимизацию как теплового фона, падающего на ВІВ-структуру, так и токов утечки. Величина тока измерялась электрометром В7Э-42, шумовой порог по току составлял 10^{-15} А . Абсолютная величина температуры и ее стабильность контролировались полупроводниковым датчиком. Температура изменялась путем регулировки подъема держателя над поверхностью гелия.

Результаты измерения вольт-амперных характеристик и их обсуждение

Вольт-амперные характеристики ВІВ-структуры имеют достаточно сложный вид и охватывают много порядков по току, их типичный вид представлен в логарифмическом масштабе на рис. 1. Площадь исследованных элементов структуры составляла $70 \times 80 \text{ мкм}^2$. При этом положительный потенциал на планарном электроде соответствует рабочей полярности фотоприемника, а отрицательный — обратной полярности. Анализ показывает, что в области I при относительно высоких температурах $T > 17 \text{ К}$ и малых напряжениях ВАХ является линейной и ток экспоненциально зависит от температуры (рис. 3) с энергией активации ϵ , близкой к энергии активации донорного уровня As в Si. Отсюда

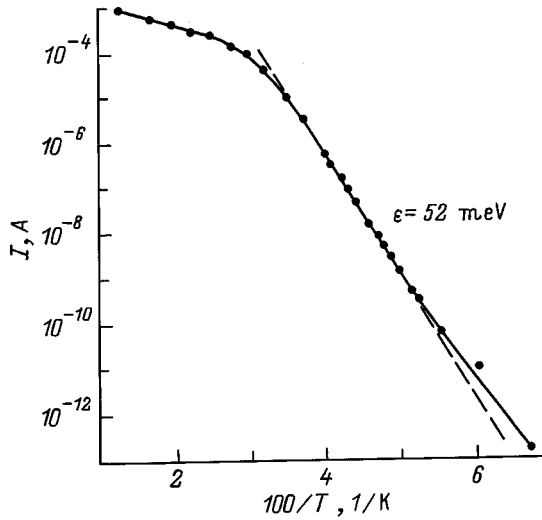


Рис. 3. Температурная зависимость тока в ВІВ-структуре при $T > 17$ К и напряжении смещения $V = 0.3$ В. Энергия ионизации одиночного атома мышьяка в кремнии $E_{As} = 54$ мэВ.

следует, что в этой области ток определяется равновесными электронами, движущимися по зоне проводимости. При понижении температуры ток на участке I становится неизмеримо мал. Основной особенностью ВАХ ВІВ-структур, предсказанной в работе [10], является их асимметрия, а именно — в области рабочей полярности появляется зона II шириной от десятых долей В до нескольких В, в которой ток становится неизмеримо мал, т.е. проявляется блокировка тока, обусловленная асимметрией ВІВ-структуры. Эта блокировка связана с тем, что при рабочей полярности ВІВ-структуры (рис. 4, *a*) приложенное внешнее смещение падает как в блокирующем слое, так и в области пространственного заряда фоточувствительного слоя, возникающего за счет конечной концентрации компенсирующих акцепторов. При обратной полярности внешнее смещение целиком падает на блокирующем слое (рис. 4, *b*), который в несколько раз тоньше фоточувствительного слоя, что приводит к большему значению электрического поля на инжектирующем планарном омическом контакте и экспоненциальному росту тока, начиная с малых смещений. При рабочей полярности внешнего напряжения аналогичный рост тока наблюдается при достижении определенного смещения. К сожалению, остальные особенности ВАХ ВІВ-структур в работе [10] не содержатся ввиду предельно простой ее модели, заложенной в расчет, — модели сквозного пробоя (punch-through) структуры.

Экспоненциальный рост тока на участке III можно, по видимому, рассматривать как туннелирование электронов из примесной зоны в зону проводимости кремния на границе фотослой–(блокирующий слой) при положительной полярности смещения и как туннелирование электронов из N^{++} -области планарного омического контакта в зону проводимости блокирующего слоя при отрицательной полярности. Туннельный ток в более простых

структурах $N^{++}-N-N^{++}$ наблюдался ранее при гелиевых температурах в [12]. При обеих полярностях этот экспоненциальный рост тока (участок III) переходит в более плавный участок IV. На этом участке наблюдается экспоненциальная зависимость тока от температуры (рис. 5). Энергия активации при $V = +1$ В составляет $\varepsilon = 8.5$ мэВ, что соответствует току, ограниченному прыжковой проводимостью по примесной зоне в кремнии при данной концентрации доноров $N_d = 5 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ и акцепторов $N_a = 2 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$. Для проверки этого объяснения поведения тока на участке IV из ВІВ-структур путем стравливания блокирующего слоя были изготовлены структуры $N^{++}-N^+-N^{++}$. Их ВАХ в этом диапазоне температур полностью соответствует IV участку ВАХ ВІВ-структур. Положение уровня Ферми в примесной зоне по отношению к уровню изолированного донора в соответствии с моделью для слабой компенсации [13] определяется соотношением $E_F = 0.99q^2N_D^{1/3}/4\pi\chi$. Здесь q — заряд электрона, χ — диэлектрическая постоянная полупроводника. В нашем случае получаем $E_F = 9$ мэВ, что близко к экспериментальному значению энергии активации и говорит о том, что проводимость по примесной зоне связана с дырками, заброшенными с уровня

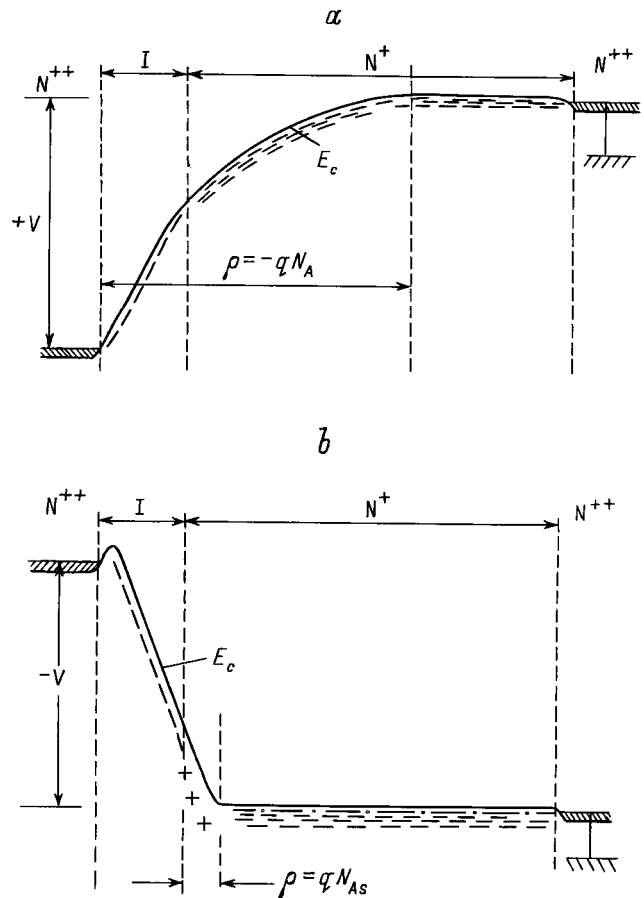


Рис. 4. Распределение потенциала в ВІВ-структуре: *a* — при рабочей полярности внешнего смещения, *b* — при обратной полярности.

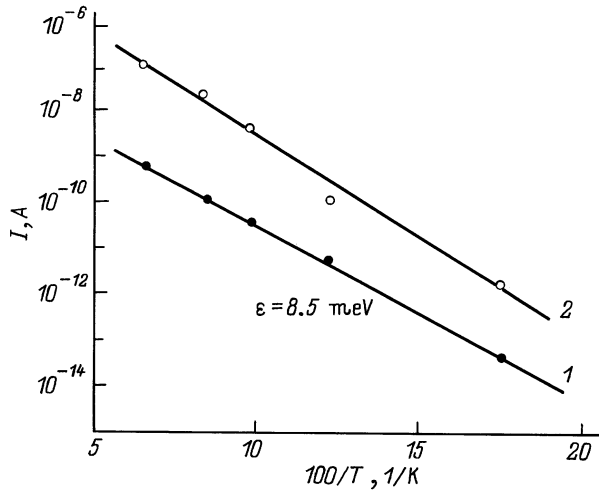


Рис. 5. Температурная зависимость тока в ВІВ-структуре при: 1 — рабочей полярности (+1 В), 2 — обратной полярности (-1 В).

Ферми в пик плотности состояний примесной зоны. Величина подвижности по примесной зоне, оцененная на участке IV из величины плотности тока в структуре и концентрации акцепторов, составляет $\mu \cong 1 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что согласуется с данными работы [4].

При переходе из области смещений IV в область V наблюдается роста ампер-ваттной чувствительности ВІВ-фотоэлементов, достигающей нескольких сотен А/Вт. В работах [14,15] этот рост связывается с лавинным размножением носителей заряда за счет ударной ионизации примесных центров. Однако в этом случае необходимо, чтобы прыжковая проводимость по примесной зоне, будучи включена последовательно с лавиной, могла обеспечить отток носителей из области размножения и наблюдаемое значение тока. Не исключено, что усиление фототока вызвано влиянием положительного заряда примесных центров на рост туннельного контактного тока, и этим объясняется поведение ВАХ на участке V. При дальнейшем увеличении напряжения как при положительной, так и при отрицательной полярности смещения наблюдается экспоненциальный рост тока. Окончательный ответ о природе экспоненциального роста тока на участке V может быть получен при сравнении эксперимента с результатами численного моделирования, результаты которого в скором времени будут представлены.

На участке VI величина тока и поведение ВАХ определяются сопротивлением подложки.

Заключение

В работе приведены результаты экспериментального исследования вольт-амперных характеристик ВІВ-структур в широком диапазоне температур.

Исследование темновых ВАХ ВІВ-структур показало, что только два участка, а именно II и VI участки (см. рис. 1), могут быть использованы для эффективной работы структуры в качестве фотоприемного элемента в двумерной матрице. На участке II отсутствует шум, связанный с темновым током, так как последний неизмеримо мал. На участке IV эта компонента шума есть, но мал ее разброс по матрице, ввиду малого разброса тока на этом участке от элемента к элементу. И если шум, вызванный прыжковой проводимостью, не будет определяющим в общем шуме ФПУ, то повышение напряжения на фотоэлементах может оказаться желательным, ввиду роста толщины слоя объемного заряда и, следовательно, роста ампер-ваттной чувствительности.

Интересным для работы одиночного ВІВ-фотоприемника является участок V, где наблюдается одновременно рост мощности шума и фотоответа. На этом участке величина ампер-ваттной чувствительности достигает нескольких сотен А/Вт, а обнаружительная способность проходит через максимум, но большой разброс темновых токов от элемента к элементу не позволяет их использовать в матрице. По этой же причине нецелесообразно использовать участок III для регистрации ИК излучения в матричных ФПУ.

Авторы благодарят Д.О. Леонова за помощь в изготовлении образцов.

Список литературы

- [1] M.D. Petroff, M.G. Stapelbroek. *Blocked Impurity Band Detectors*. U.S. Patent No. 4, 568, 960; filed Oct. 1980; granted 4 Feb.1986.
- [2] D.B. Reynolds, D.H. Seib, S.B. Stetson, T. Herter, N. Rowlands, J. Schoenwald. *Trans. Nucl. Sci.*, **36**, 857 (1989).
- [3] R.A. Noel. *Proc. SPIE*, **1685** (*Infrared Detectors and Focal Plane Arrays*), 250 (1992).
- [4] M.D. Petroff, M.G. Stapelbroek, W.A. Kleinhaus. *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 406 (1987).
- [5] D.M. Watson, J.E. Huffman. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 1602 (1988).
- [6] J.E. Huffman, A.G. Grouse, B.L. Halleck, T.V. Downes, T.L. Herter. *J. Appl. Phys.*, **72**, 237 (1992).
- [7] Б.А. Аронзон, Д.Ю. Ковалев, А.М. Козлов, Ж. Леотин, В.В. Рьльков. *ФТП*, **32**, 192 (1998).
- [8] В.В. Болотов, Г.Н. Камаев, Г.Н. Феофанов, В.М. Эмексузян. *ФТП*, **24**, 1697 (1990).
- [9] В.М. Эмексузян, Г.Н. Камаев, Г.Н. Феофанов, В.В. Болотов. *ФТП*, **31**, 311 (1997).
- [10] V.G. Martin. *Sol. St. Electron.*, **33**, 427 (1990).
- [11] N.Sclar. *Prog. Quant. Electron.*, **9**, 149 (1984).
- [12] E. Simoen, B. Dierickx, L. Deferm, C. Claeys, G. Declerck. *J. Appl. Phys.*, **68**, 4091 (1990).
- [13] М. Мотт, Э. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1982).
- [14] F. Szmulowicz, F.L. Madarsz. *J. Appl. Phys.*, **62**, 2533 (1987).
- [15] F. Szmulowicz, F.L. Madarsz, J. Diller. *J. Appl. Phys.*, **63**, 5583 (1988).

Редактор Т.А. Полянская

Current-voltage characteristics of Si:As blocked impurity-band photodetectors

D.G. Esaev, S.P. Sinitsa, E.V. Chernyavsky

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Results of experimental investigation of the current-voltage characteristics of Si:As blocked impurity-band (BIB) structures are presented. The investigation of dark current behavior has been made in the temperature range $7 \div 25$ K and bias voltage $-4 \div +4$ V. The results obtained are discussed in terms of an optimal BIB structure in IR photosensitive focal plane array and single detector.

FAX: (3832) 35-52-92 (S.P. Sinitsa)

E-mail: esaev@thermo.isp.nsc.ru (D.G. Esaev)