

Д. ф.-м. н. Ш. Д. КУРМАШЕВ, д. ф.-м. н. И. М. ВИКУЛИН,
д. т. н. С. В. ЛЕНКОВ, Р. Г. СИДОРЦ

Дата поступления в редакцию
20.03 — 30.08 2002 г.

Украина, г. Одесса, Нац. университет им. И. И. Мечникова,
Нац. академия связи им. А. С. Попова

Оппонент к. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

СПЕКТРАЛЬНАЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ Ni—Si:Au ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР С ИНЖЕКЦИОННЫМ УСИЛЕНИЕМ

Использование поверхностно-барьерных структур позволяет получать высокоэффективные фотоприемники с инжекционным усилением, чувствительные в области примесного поглощения кремния.

В настоящее время промышленность выпускает большое число фотоприемников с высокой фоточувствительностью, например лавинные фотодиоды. Однако их спектральный диапазон чувствительности ограничен областью собственного поглощения материалов, из которых они изготовлены (собственная фоточувствительность). Практически только фоторезисторы являются приемниками излучения, проявляющими чувствительность в "примесной" области спектра (примесное поглощение). Отсюда следует, что инжекционные фотодиоды, базой которых являются полупроводники с глубокими примесными энергетическими уровнями, могут быть фотоприемниками, обладающими чувствительностью в спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области в сочетании с высокой обнаружительной способностью.

В качестве инжекционных фотоприемников могут быть использованы поверхностно-барьерные структуры (ПБС) на основе компенсированных полупроводников [1, с. 101]. Они работают при прямом электрическом смещении. Фотоэлектрическое инжекционное усиление реализуется за счет модуляции параметров носителей заряда (время жизни, биполярная дрейфовая подвижность, ...) при освещении и достаточно сильной инжекции носителей заряда в объем полупроводника из контактов. Однако физический механизм инжекционного усиления на разных участках вольт-амперной характеристики ПБС до настоящего времени не определен достаточно четко.

В данной работе приведены результаты изучения спектров фоточувствительности ПБС на основе кремния, компенсированного золотом.

Одним из условий реализации фотоэлектрического инжекционного усиления является обеспечение высокого уровня инжекции неосновных носителей заряда из металлического контакта в базу полупроводника. В работе [2] обсуждены различные возможности получения высокого уровня инжекции в ПБС

на основе контакта Ni—Si:Au, при котором имеет место модуляция проводимости базы инжектированными носителями заряда и достаточно сильная перезарядка глубоких энергетических уровней (золото) в объеме полупроводника.

Золото является одной из наиболее изученных примесей в кремнии. Оно дает два уровня в запрещенной зоне Si — донорный с энергией активации $E=E_v+0,35$ эВ и акцепторный — $E=E_c-0,54$ эВ [3]. На рис. 1 показана зонная диаграмма n-Si:Au. Здесь 1 и 4 — энергия потолка валентной зоны (E_v) и дна зоны проводимости (E_c), соответственно; 2 — уровень, соответствующий ноль-зарядным атомам золота (Au^0), 3 — уровень минус-однозарядных ионов золота. Обозначена энергия активации глубоких центров Au.

Нами исследовались структуры, полученные нанесением никеля на кремний методом вакуумного напыления с последующим вжиганием; длина базы ПБС $d=0,2...0,5$ мм. Изучались также эквивалентные фоторезисторы — структуры с теми же геометрическими размерами, но с неинжектирующими (омическими) контактами. Температура измерений $T=77$ К.

При относительно небольших прямых смещениях ВАХ ПБС линейна (рис. 2). У диодов с $d=0,2...0,3$ мм далее, с ростом напряжения V , следует степенной участок зависимости тока I от напряжения V вида $I\sim V^n$, где $n\approx 2$. Затем наблюдается область сильного роста тока с напряжением и "срыв" на участок отрицательного дифференциального сопротивления (показан пунктиром), обусловленный т. н. инжекционным пробоем. Линии $I\sim V^2$ и $I\sim V$ — наклоны "квадратичного" и "линейного" (омического) участков ВАХ, V_{12} — напряжение перехода с линейного на степенной участок ВАХ ПБС.

У структур с $d>0,3$ мм сверхлинейный (степенной) участок ВАХ характеризуется более слабой зависимостью I от V ($n<2$), и пробой носит тепловой характер. ВАХ эквивалентных резисторов линейны практически во всем диапазоне напряжений (рис. 2).

Участок сверхлинейного роста тока структур с выпрямляющим контактом (ПБС) свидетельствует о

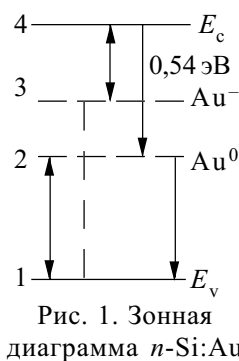


Рис. 1. Зонная диаграмма n-Si:Au

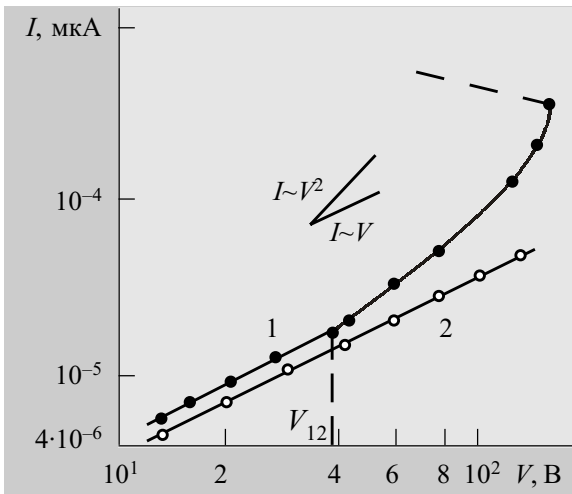


Рис. 2. Темновая ВАХ Ni—Si:Au-диода (1) и эквивалентного резистора (2)

достаточно сильной модуляции проводимости базы инжекцией носителей заряда из контактов. Тем не менее, вследствие того, что коэффициент инжекции γ меньше 0,4, наблюдается "затянутость" переходного участка ВАХ между областями с $n=1$ и $n=2$. У структур с $d>0,3$ мм не происходит достаточно сильной модуляции проводимости базы инжекционным током, и $n<2$. Кроме того, при достаточно большом токе происходит снижение γ , и степень модуляции снижается настолько, что инжекционного пробоя не происходит [2].

Для ВАХ ПБС в отсутствие освещения напряжение перехода с "омического" участка на "квадратичный" для температуры $T=77$ К рассчитывалось по формуле

$$V_{12} = d^2 / \mu_p \tau_p \quad (1)$$

Подвижность дырок $\mu_p \approx 4 \cdot 10^3$ см²/В·с. Время жизни дырок определялось из соотношения $\tau_p = (\sigma_p v_T N_{Au})^{-1}$. Сечение захвата дырки отрицательно заряженными ионами золота при 77 К $\sigma_p = (1 \dots 2,4) \cdot 10^{-13}$ см² [3], концентрация минус-однозарядных ионов золота $N_{Au} \approx 10^{14}$ см⁻³, тепловая скорость частиц $v_T \approx 1,2 \cdot 10^7$ см/с.

Расчитанное значение $V_{12} \approx 25$ В по порядку величины примерно соответствует напряжению V_{12} на рис. 2 (~40 В). Несколько большая величина V_{12} для реального образца может быть следствием преобладания тока экстракции электронов из объема полупроводника в полном токе через ПБС. "Крутые" участки ВАХ перед "срывом" объясняются некоторой зависимостью времени жизни носителей заряда от уровня инжекции. Это и приводит, в конечном счете, к увеличению биполярной дрейфовой подвижности и появлению участка инжекционного пробоя на ВАХ [4, с. 19; 5].

Токовую фоточувствительность S_I инжекционного фотодиода на основе ПБС определяли как отношение фототока I_ϕ в режиме короткого замыкания к мощности падающего излучения Φ . Если свет не модулирован,

$$S_I = I_\phi / \Phi = (I_c - I_T) / \Phi, \quad (2)$$

где I_c — полный ток, I_T — темновой ток.

При подаче модулированного излучения S_I определяли как отношение эффективного значения первой гармоники фототока к эффективному значению первой гармоники мощности падающего потока. При измерении относительных спектральных характеристик фоточувствительности в качестве источника излучения использованы глобар спектрометра ИКС-21. Для устранения нелинейных эффектов мощность выходящего потока выбирали так, чтобы максимальный фототок I_ϕ не превышал темнового тока.

При изучении фотоэлектрических характеристик внимание уделялось, в первую очередь, выявлению механизмов, обеспечивающих усиление первичного фототока (фотопроводимости), обусловленного засветкой. С этой целью измеряли интегральную токовую чувствительность ПБС и эквивалентных фоторезисторов. Токовая чувствительность измерялась до напряжений, при которых появлялись шумы или токовые неустойчивости, делающие регистрацию фототока невозможной.

Зависимость S_I от внешнего смещения V при засветках фотонами с энергией $h\nu=0,55 \dots 0,7$ эВ подобна темновой ВАХ (рис. 3, кривая 1). Это понятно, т. к. темновой ток в данном случае является фототоком фонового излучения с $T=300$ К, т. е. мы имеем дело с двумя фототоками, возбужденными длинноволновой подсветкой. При действии света с $h\nu=0,8$ эВ сверхлинейный участок S_I начинается при $V_{12}^{S_I} < V_{12}$ (на рис. 3 $V_{12}^{S_I} \approx 20$ В). Зависимость S_I от V для эквивалентных фоторезисторов (кривые 1' и 2') практически совпадает с линейными участками $S_I(V)$ ПБС. При действии света из области собственного поглощения график $S_I(V)$ (кривая 3) вплоть до предсрывного участка практически линейен ($I \sim V$).

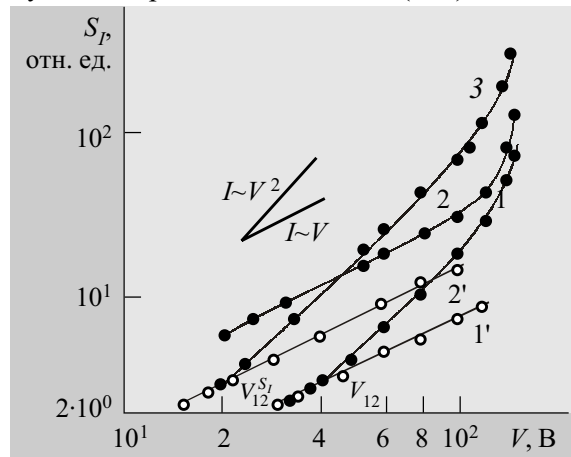


Рис. 3. Зависимость токовой фоточувствительности S_I от напряжения V для ПБС (1—3) и для эквивалентных фоторезисторов (1' и 2')

Энергия фотонов, эВ: 1 — 0,6; 2 — 0,8; 3 — 1,2

Спектральная характеристика Ni—Si:Au-структур при изменении напряжения V претерпевает деформацию. На рис. 4 показаны спектральные характеристики одного из образцов, снятые при напряжениях 20, 40 и 80 В. Кривая 1 соответствует линейному участку темновой ВАХ ПБС. Кривая 2 отвечает линейному участку темновой ВАХ и линейной зависимости $S_I(V)$ при $h\nu \approx 0,6$ эВ и степенной ($I \sim V^2$) при $h\nu \approx 0,8$ эВ (см. рис. 3, кривые 1 и 2). Кривая 3 соответствует квад-

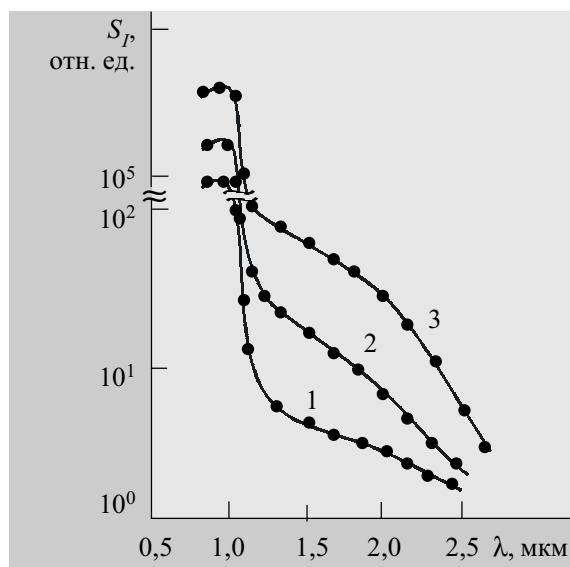


Рис. 4. Спектральные характеристики фоточувствительности ПБС (длина базы диода $d=0,25$ мм) Напряжение смещения V , В: 1 — 20; 2 — 40; 3 — 80

ратичному участку ВАХ для всех диапазонов зависимости S_I от V . Кривая 1 определяет также спектральную чувствительность эквивалентного фоторезистора. Значительный рост чувствительности в области примесного поглощения кремния ($\lambda > 1,1$ мкм) по отношению к фоторезистору у Ni—Si: Au-ПБС начинается при напряжениях V , для которых имеет место сверхлинейная зависимость S_I от V . Так, для $h\nu \approx 0,8$ эВ она реализуется уже при $V \approx 40$ В. Поэтому чувствительность в области $\lambda \approx 1,5$ мкм ($h\nu \approx 0,8$ эВ) растет сильнее, чем при $\lambda = 2,1$ мкм ($h\nu \approx 0,6$ эВ) (рис. 4, кривые 1 и 2). Чувствительность в области собственно поглощения ($\lambda < 1,1$ мкм) увеличивается по линейному закону.

На рис. 5 показаны распределения коэффициента инжекционного усиления K для разных энергий фотонов, снятые при разных напряжениях. Коэффициент усиления определяли как отношение токовой чувствительности ПБС к чувствительности эквивалентного фоторезистора для фотонов равных энергий при фиксированных внешних смещениях V . Видно, что величина коэффициента K максимальна при $h\nu \approx 0,8$ эВ и его рост начинается при меньших напряжениях (по отношению к $h\nu \approx 0,6$ эВ).

В диодных структурах с $d/L \gg 1$ (L — длина диффузии носителей заряда) перенос носителей связан с биполярным дрейфом в электрическом поле базы [5]. Механизм фотоэлектрического инжекционного усиления в данном случае связан с воздействием света на биполярную дрейфовую подвижность μ , определяющую распределение неравновесных носителей заряда и уровень инжекции [4, с. 9].

$$\mu = \left(n - p \frac{d_n}{d_p} \right) \left(\frac{n}{\mu_p} + \frac{p}{\mu_n} \right)^{-1} \quad (3)$$

Здесь n и p — концентрации электронов и дырок, соответственно.

Освещение, особенно примесное, меняет соотношение между n и p и определяет инжекцию из кон-

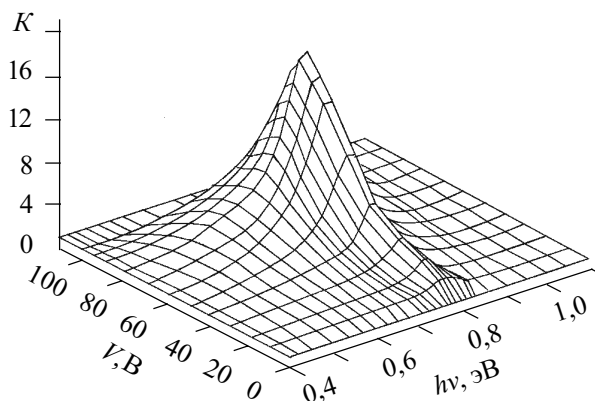


Рис. 5. Распределение коэффициента инжекционного усиления для разных энергий фотонов и разных напряжений смещения

тактов. Напряжение перехода с линейного участка зависимости $S_I(V)$ на квадратичный имеет вид [6]

$$V_{12}^{S_I} = \frac{\mu_n(n_0 + n_t) + \mu_p(p_0 + p_t)}{\left| (n_0 + n_t) - \delta(p_0 + p_t) \right| - |n_0 - \delta p_0|} \cdot \frac{d^2}{\mu_n \mu_p \tau_p} \quad (4)$$

где n_0 и p_0 — равновесные концентрации электронов и дырок;

n_ϕ и p_ϕ — концентрации электронов и дырок, генерированных светом;

$$\delta = \tau_n / \tau_p.$$

При "примесной" засветке, в случае генерации носителей заряда одного знака (переходы 3—4 на рис. 1), равенство (4) переходит в (1), что и имеет место в нашем случае для $h\nu \approx 0,6$ эВ (рис. 2, рис. 3, кривая 1). Для "собственной" засветки $n_\phi = \delta p_\phi$ и $V_{12}^{S_I} \rightarrow \infty$, т. е. зависимость $S_I = f(V)$ линейна за исключением предсрывной области (рис. 3, кривая 3), за которой следует инжекционный пробой.

Расчет показывает, что при действии света с $h\nu \approx 0,8$ эВ, помимо генерации электронов, имеет место также генерация неравновесных дырок (переходы 1—3, рис. 1). При этом в (4) сохраняется соотношение $\mu_n n_\phi > \mu_p p_\phi$, но $n_\phi < \delta p_\phi$, и

$$V_{12}^{S_I} \approx \frac{n_t}{\delta p_\phi} \cdot \frac{d^2}{\mu_p \tau_p} \quad (5)$$

Именно по этой причине при $h\nu \approx 0,8$ эВ напряжение $V_{12}^{S_I} \approx 20$ В меньше напряжения V_{12} на темновой ВАХ.

Как видно из рис. 5, на квадратичном участке наибольшее инжекционное усиление приходится на энергию фотонов $h\nu \approx 0,8$ эВ и может достигать 10 и бо-

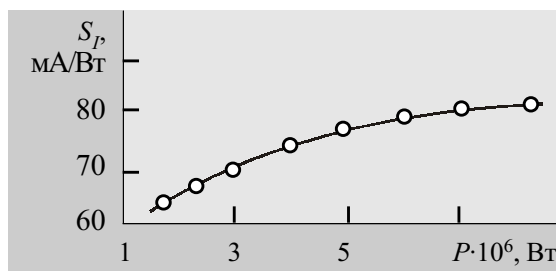


Рис. 6. Зависимость токовой фоточувствительности от мощности засветки P

лее. "Примесный" фототок с увеличением I растет быстрее "собственного", что и является причиной деформации спектральной характеристики (рис. 4) при изменении напряжения внешнего смещения.

Характерной для Ni—Si:Au-ПБС является нелинейность мощностной характеристики (рис. 6). Рост токовой чувствительности S_I с увеличением уровня засветки связан с изменением времени жизни носителей заряда при перезарядке глубоких уровней золота в кремнии при освещении [7, с. 139].

Выводы

1. Сверхлинейность ВАХ длинных Ni—Si:Au-диодов объясняется увеличением биполярной дрейфовой подвижности носителей заряда при росте уровня инжекции.

2. Реализовано инжекционное усиление фототока в Ni—Si:Au поверхностно-барьерных структурах. Наибольшее усиление приходится на область длин волн $\lambda=1,25 \dots 2,25$ мкм (энергии фотонов $h\nu=0,9 \dots 0,85$ эВ)

и может достигать 10 и более. Инжекционное усиление в данном случае связано с ростом биполярной подвижности при засветке.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Анисимова И. Д., Викулин И. М., Курмашев Ш. Д. Полупроводниковые фотоприемники. — М.: Радио и связь, 1984.
2. Курмашев Ш. Д., Викулин И. М., Сидорец Р. Г., Софронков А. Н. Инжекция неосновных носителей заряда в поверхностно-барьерных структурах на основе Si:Au // Фотоэлектроника. — 2002. — № 11. — С. 46—52.
3. Bullis W. M. Properties of gold in silicon // Sol. St. Electronics. — 1966. — Vol. 9, N 3. — P. 143—149.
4. Викулин И. М., Курмашев Ш. Д., Стафеев В. И. Фотоприемники с инжекционным усилением — М.: Электроника, 1989.
5. Шевчук О. Б., Курмашев Ш. Д., Стафеев В. И., Викулин И. М. Коэффициент усиления инжекционных фотодиодов // Наукові праці УДАЗ. — 2000. — № 1. — С. 3—7.
6. Kurmashev Sh., Stafeev V., Viculin I. Injection-amplification IR-photodiodes // Proc. of SPIE. — 1997. — Vol. 3182. — P. 59—67.
7. Роуз А. Основы теории фотопроводимости. — М.: Мир, 1966.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

4-я Международная научно-практическая конференция

«СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

(«СИЭТ—2003»)

Одесса 19—23 мая 2003 г.

ПРОБЛЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- ✓ Техническая и инвестиционная политика в области разработки и производства электронных средств
- ✓ Телекоммуникационные технологии и системы
- ✓ Информационные технологии и системы. Безопасность информационных технологий
- ✓ Информационно-преобразовательные системы, в т. ч. для дистанционных исследований
- ✓ Конструирование и производство электронной аппаратуры, обеспечение качества, надежности, в т. ч. тепловых режимов
- ✓ Конструирование и производство электронных компонентов. Функциональная микроэлектроника. Фотоприемники.
- ✓ Математическое моделирование в задачах электроники
- ✓ Программное обеспечение и компьютерные методы моделирования производственных процессов
- ✓ Системы автоматизированного проектирования в электронике
- ✓ Технологии микроэлектроники. Современные проблемы негатроники
- ✓ Нанометровые структуры и технологии
- ✓ Материалы электронной техники. Диагностика, контроль качества
- ✓ Приборы и устройства биомедицинской электроники

Текущую информацию о «СИЭТ—2003»,
в т. ч. о заявленных докладах, читайте в сети Интернет
<http://www.tkea.wallst.ru/konfer.html>



Секретарь Оргкомитета Тихонова Елена Анатольевна

E-mail: <tkea@odessa.net>.

Тел./факс +38 (048) 733-67-91,

тел. +38 (048) 733-72-83.