

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

ФОТО ЭЛЕКТРОНИКА

МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ СБОРНИК

Основан в 1986 г.

Выпуск **11**

Одесса
«Астропринт»
2002

В сборнике приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по вопросам оптоэлектроники, солнечной энергетики и полупроводникового материаловедения фотопроводящих материалов. Рассмотрены перспективные направления развития фотоэлектроники.

Для преподавателей, научных работников, аспирантов, студентов.

У збірнику наведені результати теоретичних і експериментальних досліджень з питань оптоелектроніки, сонячної енергетики і напівпровідникового матеріалознавства фотопровідних матеріалів. Розглянуто перспективні напрямки розвитку фотоелектроніки.

Для викладачів, наукових працівників, аспірантів, студентів.

Редакционная коллегия:

В. А. СМЫНТЫНА (отв. редактор) — академик АН ВШ Украины; **М. И. КУТАЛОВА** (отв. секр.); **В. Т. МАК** — д-р физ.-мат. наук; **В. Г. ЛИТОВЧЕНКО** — чл.-корр. НАН Украины; **И. М. ВИКУЛИН** — д-р физ.-мат. наук, проф.; **А. Е. КИВ** — д-р физ.-мат. наук, проф.; **Г. Г. ЧЕМЕРЕСЮК** — проф.; **М. К. ШЕЙНКМАН** — чл.-корр. НАН Украины.

Адрес редакционной коллегии:

65100, Одесса, ул. Пастера, 42, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова. Тел. 23-34-61.

¹ Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова, Одесса, Украина² Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова, Одесса, Украина³ ИП научно-исследовательский институт «Темп», Одесса, Украина⁴ Ополевикий государственный университет, Ополе, Польша

ИНЖЕКЦИЯ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ Si: Au

Обсуждается инжекция носителей заряда в поверхностно-барьерных структурах Ni—Si: Au при прямом смещении в приближении термоэлектронной эмиссии — диффузии. Показано, что коэффициент инжекции γ может быть достаточно большим при наличии диэлектрической прослойки (SiO_2) между металлом и полупроводником. Повышение удельного сопротивления исходного материала и снижение температуры также способствует росту γ .

Для эффективной работы инжекционных фотоприемников, светодиодов, полупроводниковых лазеров необходимо обеспечить достаточно сильную электрическую инжекцию носителей заряда из контакта в объем полупроводника. В случае поверхностно-барьерных структур (ПБС) инжекция неосновных носителей (НН) заряда достаточно затруднена. Тем не менее, как показывают исследования, инжекция НН оказывает существенное влияние на параметры и характеристики ПБС-структур [1]. Влияние инжекции НН в приближении теории термоэлектронной эмиссии — диффузии изучалось в [2, 3]. Показано, что при сравнимых концентрациях инжектированных дырок и доноров N_d (полупроводник n -типа) происходит замедление роста концентрации дырок в базе диода при увеличении прямого напряжения и замедление роста коэффициента инжекции γ (как известно, $\gamma = I_p / (I_n + I_p)$ — отношение тока неосновных носителей заряда к полному току через ПБС). Как правило, у поверхности полупроводника при контакте его с металлом образуется инверсный слой с повышенной концентрацией НН, из которого возможна их инжекция в объем полупроводника. Коэффициент инжекции γ можно повысить, если поместить между металлом и полупроводником тонкий диэлектрический слой [4]. Для очень тонких диэлектрических слоев эффект увеличения γ возникает преимущественно из-за того, что ток I_n (экстракция электронов из объема n -полупроводника) ограничен термоэмиссией и, следовательно, пропорционален вероятности туннельного прохождения электронов через оксидный слой. Дырочный ток из металла I_p определяется диффузией в квазинейтральной области и относительно слабо зависит от промежуточного диэлектрического слоя (рис. 1). Для более толстых диэлектрических слоев происходит большой сдвиг зон полупроводника относительно уровня Ферми металла и большее число дырок может туннелировать из металла в полупроводник. Этот эффект используется для увеличения инжекционной эффективности электролюминесцентных диодов [5].

Для создания структур с инжекционно — плазменным усилением (фотоприемники [6, 7], датчики газов [8], магниточувствительные сенсоры) на основе ПБС необходимо изготавливать структуры с возможно большим коэффициентом инжекции γ в объем полупроводника. В настоящей работе проводилось исследование инжекции в контакте никель-кремний, компенсированный золотом (Ni—Si: Au). Диэлектрической прослойкой между металлом и полупроводником служил оксид SiO_2 . Зависимость инжекционных свойств контактов от толщины диэлектрической прослойки изучалась на специально изготовленных биполярных транзисторных структурах из n -Si. Толщина диэлектрической прослойки регулировалась выдержкой на воздухе или прогревом образцов в течении определенного времени. Толщину слоя SiO_2 измеряли эллипсометрическим методом до операции нанесения Ni. На диодных структурах о толщине диэлектрического слоя можно было судить также по величине показателя идеальности β для прямых ветвей вольтамперных характеристик ($I \sim \exp(qV/\beta kT)$). Измерения проводили при $T = 300 \dots 77$ К.

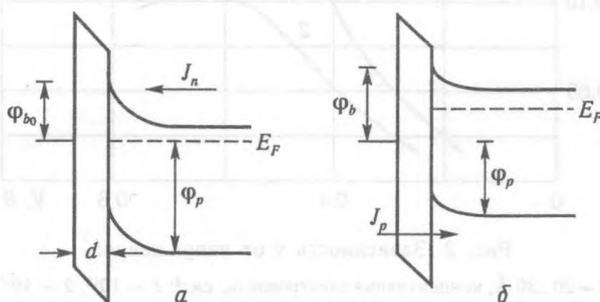


Рис. 1. ПБС с диэлектрической прослойкой между металлом и полупроводником:

а — в отсутствие электрического смещения; б — при прямом смещении

На рис. 2 показана зависимость коэффициента γ от прямого тока I для образцов на основе Si с равновесной концентрацией электронов $n_0 \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при разных толщинах слоя SiO_2 .

Показатель идеальности ВАХ β для графиков 1—3 составляет 1,09, 1,25 и 1,5 соответственно.

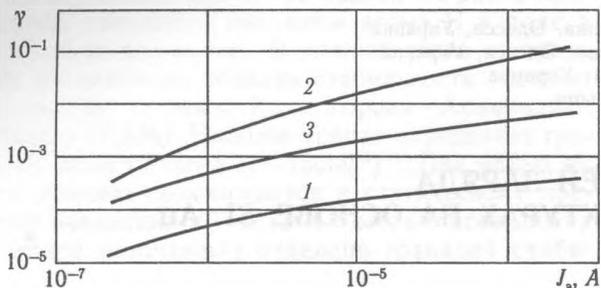


Рис. 2. Зависимость β от тока I_s :

толщина базы 10 мкм; $T = 300$ К; толщина слоя SiO_2 d , Å: 1 — 15; 2 — 25; 3 — 60

Установлено, что оптимальной с точки зрения инжекции толщиной диэлектрической прослойки является толщина $d = 25 \dots 40$ Å. Это согласуется с данными работы [4]: часть приложенного напряжения падает на обедненном слое, что уменьшает высоту барьера ϕ_b для НН туннелирующих из металла в полупроводник. При достаточно большом прямом смещении туннелирование дырок преобладает над термоэлектронной эмиссией. С ростом d электронный ток уменьшается в большей мере, чем дырочный, что способствует росту β . Причиной этого является то, что ток I_p через тонкий оксид SiO_2 ограничен не условиями туннелирования, а областью объемного заряда полупроводника. Для относительно толстых оксидов ($d > 100$ Å) туннелирование дырочного тока ограничено и уменьшается с ростом d .

В значительной мере инжекционная способность контакта зависит от удельного сопротивления исходного кремния. На рис. 3 показана зависимость β от внешнего смещения для ПБС,

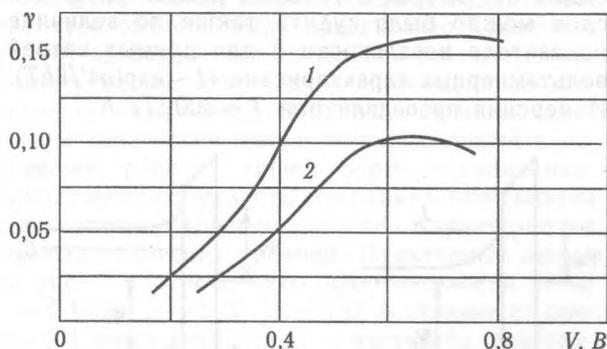


Рис. 3. Зависимость β от напряжения:

$d = 20 \dots 30$ Å, концентрация электронов n_0 , см⁻³: 1 — 10^{15} , 2 — 10^{17}

изготовленных в идентичных условиях, но с различными концентрациями мелкой легирующей примеси (фосфор). Толщина SiO_2 $d = 20 \dots 30$ Å. Величина β проходит через максимум с ростом напряжения. Такой ход зависимости соответствует расчету коэффициента инжекции β при наличии диэлектрической прослойки между металлом и полупроводником. Согласно диодной теории, в случае $I_p \ll I_n$ коэффициент

$\beta \sim \exp(qV_1/kT)$, где V_1 — падение напряжения на диэлектрической прослойке. С ростом внешнего смещения V коэффициент β увеличивается. Высота потенциального барьера для электронного тока экстракции из полупроводника (см. рис. 1) изменяется на qV_2 (V_2 — падение напряжения на области пространственного заряда полупроводника), а для дырочного тока из металла в полупроводник как $q(V_1 + V_2 = V)$. Поэтому дырочный ток независимо от толщины барьера (ОПЗ) изменяется пропорционально $\exp(qV/kT)$.

Спад величины β с ростом напряжения, в соответствии с [2] может быть объяснен тем, что при сравнимых концентрациях дырок и донорной примеси происходит замедление роста концентрации дырок в базе при увеличении приложенного напряжения. Кроме того, в нашем случае, исходя из величины потенциального барьера $\phi_b \approx 0,67$ эВ, можно утверждать, что у поверхности кремния существует инверсионный слой с повышенной концентрацией дырок, из которого возможна их инжекция при прямом смещении. Поскольку инжекция из металла ограничена (подход дырок к контакту контролируется термоэлектронной эмиссией) при определенном напряжении коэффициент β достигает максимального значения и затем с ростом V уменьшается.

Как видно из рис. 3, чем меньше концентрация равновесных носителей заряда в исходном полупроводнике, тем больше коэффициент инжекции. Этот результат качественно согласуется с уравнениями для коэффициента β , приведенными в [9]. Чем меньше эффективная концентрация примеси, задающая равновесную концентрацию основных носителей заряда, тем меньше потенциальный барьер для дырок (т. е. диффузионный потенциал меньше) и тем больше уровень Ферми при прямом смещении приближается к потолку валентной зоны полупроводника. Вклад дырочного тока в общий ток увеличивается. Кроме того, с ростом удельного сопротивления исходного полупроводника инжектированные носители в базе диода в большей степени двигаются в электрическом поле (дрейф), что увеличивает отток инжектированных носителей в объем базы ПБС. Таким образом, в нашем случае ток инжекции НН может быть сравним по величине с током экстракции электронов.

На рис. 4 показана зависимость β от тока, протекающего через ПБС (Ni — Si : Au) при

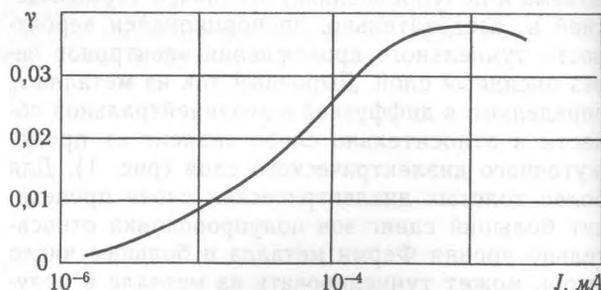


Рис. 4. Зависимость β от тока I для Ni — Si : Au — ПБС:

$T = 77$ К, $d = 40$ Å

$T=77$ К. Диффузию золота в n -Si проводили при $T=900...1000$ °С. Удельное сопротивление ρ исходного материала (марки КЭФ) в результате компенсации повышалось с $10...100$ до $10^3...10^5$ Ом·см.

Концентрация золота составляла $10^{14}...10^{15}$ см $^{-3}$. Для данной структуры при обсуждении процессов токопереноса следует перейти от диодной теории к диффузионной, т. к. концентрация равновесных носителей в квазинейтральной области $n < 10^{14}$ см $^{-3}$. Дырочный ток в этом случае контролируется не только прохождением носителей заряда через диэлектрическую прослойку и ОПЗ, но также прохождением их через квазинейтральную область объема полупроводника. Для диффузионной теории коэффициент γ может изменяться от 0 до 1 в зависимости от параметров полупроводника, особенностей контакта и величины приложенного напряжения. Эксперименты показали, что в таких структурах реализуется фотоэлектрическое инжекционно-плазменное усиление.

Выводы

Показано, что высокого уровня инжекции в структурах Ni:Si можно достичь за счет наличия диэлектрической прослойки между металлом и полупроводником, повышения удельного со-

противления исходного материала и снижения температуры структур.

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984. — 456 с.
2. Green M. A., Schewchun I. Minority carrier effects upon the small signal and steady state properties of Schottky diodes // Sol. St. Electr. — 1973. — V. 16, № 10. — P. 1141—1150.
3. Colzolari P. H., Graffi S., Pierini C. A numerical analysis of the Schottky barrier // Acta Freqenza. — 1972. — V. 10, № 9. — P. 690—695.
4. Card H., Rhoderick E. The effects of interfacial layer of minority carrier injection in forward — biased silicon Schottky diodes // Sol. St. Electron. — 1973. — V. 16, № 3. — P. 365—374.
5. Livingstone A., Turney K., Allen J. Electroluminescence in forward-biased zinc selenide Schottky diodes // Sol. St. Electron. — 1983. — V. 16, № 3. — P. 351—355.
6. Kurmashev Sh., Staffeev V., Vikulin I., Sofronkov A. Injection-amplification IR-photodiodes // Proc. Of SPIE. — 1997. — V. 3182. — Н. 59—67.
7. Курмашев Ш. Д., Викулин И. М., Софронков А. Н. Инжекционные фотодиоды в условиях полевого гашения неравновесной проводимости // Тр. 5-й международной конференции «Системы и средства передачи и обработки информации». — Одесса, 2001. — С. 94.
8. Курмашев Ш. Д., Гавдзик А. и др. Адсорбция водорода в Pd—Si: Au дисперсных структурах // Физика аэродисперсных систем. — 1998. — Вып. 37. — С. 6—11.
9. Родерик Э. Х. Контакты металл — полупроводник. — М.: Радио и связь, 1982. — 209 с.

№ п/п	Марка материала	Концентрация золота, см $^{-3}$	Удельное сопротивление, Ом·см	Температура, °С
1	КЭФ	10^{14}	10^2	900
2	КЭФ	10^{15}	10^3	900
3	КЭФ	10^{14}	10^4	1000
4	КЭФ	10^{15}	10^5	1000

СО Д Е Р Ж А Н И Е

В. А. Смытына, В. А. Борщак, Н. П. Затовская, М. И. Куталова, Ю. Н. Каракис, А. П. Балабан. Применение тонкопленочных неидеальных гетеропереходов для создания сенсора оптических и рентгеновских изображений	3
І. В. Штамбур, О. В. Коваленко, О. О. Прокоф'єва. Дослідження магніторозмірного резонанса у зразках антимоніда індію	6
Е. В. Андреева, З. Ф. Ивасив, В. В. Тетеркин. Исследование темнового тока и $1/f$ шума в фотодиодах CdHgTe $n+$ — p -типа	9
С. В. Колебошин, В. Я. Колебошин, Г. Г. Чемересюк. К вопросу о механизме проводимости в окисных пленках алюминия	12
Г. А. Ільчук, В. О. Українець. Фотоперетворення в структурах на основі телуриду кадмію, вирощеного методом хімічних транспортних реакцій	15
А. В. Глушков, А. П. Федчук, В. М. Игнатенко. Динамический хаос в высоковольтных состояниях ридберговских атомов во внешнем электромагнитном поле	18
Ш. Д. Курмашев, И. М. Викулин, Р. Г. Сидорец, А. Н. Софронков. Инжекция неосновных носителей заряда в поверхностно-барьерных структурах на основе Si: Au	21
Ю. А. Ницук. Электропроводность и люминесценция монокристаллов селенида цинка, отожженных в селене	24
В. Д. Сидоренко, В. М. Здешиц, Е. А. Несмашный. Волоконно-оптический датчик для определения концентрации метана	27
А. В. Соснин. Микроструктура и свойства слоев CdSe для фоточувствительных элементов СЭ-ПП, активированных в процессе их изготовления методом ВЧ-распыления	30
В. А. Дроздов, В. В. Ковальчук. Теоретичний аналіз структурних та оптичних характеристик ультрадисперсних фаз кремнію	34
С. В. Амбросов. Селективная фотоионизация атомов: резонансная перезарядка в парах щелочных элементов и урана	40
С. В. Мазурик, А. Б. Глот. Вольт-амперные характеристики керамики системы $ZnO-PbO-Co_3O_4-V_2O_5$	43
Е. Я. Глушко, С. Л. Легуша. Запертое электромагнитное поле в оптоэлектронных устройствах	46
Л. А. Витавецкая, С. В. Малиновская. Особенности излучения плазмы многозарядных ионов Рb и Вi, создаваемой ультракоротким лазерным импульсом	49
К. Ю. Каракис, В. А. Борщак, В. В. Зотов, М. И. Куталова. Релаксационные характеристики кристаллов сульфида кадмия с ИК-гашением фототока	51
М. И. Панфилов. Макроскопические дефекты в элементах интегральной оптики	55
Ю. Г. Чернякова, Г. П. Препелица, И. И. Шумлянский. Сателлитная структура линий излучения плазмы Си в малоиндуктивной вакуумной искре	59
Н. Н. Одинцов, Д. В. Иоргачев, О. В. Бондаренко, А. П. Заяц. Потери на неоднородностях оптических кабелей	61
В. Т. Мак, В. С. Манжара. Вплив γ - та електронного опромінення на спектри фотолюмінесценції CdS і CdS: Си монокристалів	65
В. В. Аулов, Е. В. Мищенко. Фотоотрыв электрона от отрицательных ионов щелочно-земельных элементов	68
С. А. Гевелюк, И. К. Дойчо, В. И. Солошенко, Д. Ф. Тимохов. Регулирование фотолюминесцентных свойств пористого кремния изменением параметров процесса анодизации	70
А. В. Лушков, А. В. Лобода. Динамика многослойной нейронной сети на основе фотонного эха	73
О. О. Птащенко, Ф. О. Птащенко. Рефрактометричні характеристики напівпровідникових лазерів	76
А. А. Свиначенко. Регулярная и хаотическая динамика мультиосцилляторных динамических систем	81
В. Т. Мак, С. В. Зубрицкий, В. И. Бейзым, Ю. Ф. Ваксман. Люминесцентные и оптические свойства нелегированных кристаллов ZnSe	83
В. П. Козловская, Н. Ю. Кольцова. Многочастичная теория молекулярного фотоэффекта: сечение фотоионизации, спектроскопические факторы двухатомных молекул и эффект «плавления» оболочек	86
А. Н. Алешин, В. А. Ляшевская, В. Е. Мандель, С. С. Павлов, В. А. Пастернак, А. В. Тюрин. Влияние межкристаллитных прослоек на электрические свойства пленок сульфида свинца	89
В. А. Борщак. Процессы релаксации неравновесного заряда в барьерной области неидеальных гетеропереходов и свойства сенсоров оптических изображений на основе таких структур	92
И. В. Куклина. Расчет энергии многоэлектронных атомных систем в сильном магнитном поле. Эффект хаоса	96
Д. О. Владимиров, В. Ю. Мандель, А. Ю. Попов, О. В. Тюрин. Вплив попереднього ультрафіолетового засвітлення на голографічні характеристики адитивно забарвлених кристалів KCl	98
И. М. Шпинарева. Оптимальное управление процессами селективной фотодиссоциации и фотоионизации молекул: новые оптимизационные модели	100
М. М. Воронцова, Н. В. Малушин, В. М. Скобеева, В. А. Смытына. Оптические и люминесцентные свойства нанокристаллов сульфида кадмия	104
М. А. Глауберман, О. А. Кулинич, Н. Н. Садова. Детектор поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МОП-транзистора	106
Р. В. Витер, В. А. Смытына, Н. Г. Евтушенко, Л. Н. Филевская, В. В. Курков. Исследование адсорбционно-кинетиических характеристик тонких пленок SnO ₂	109
В. Поживатенко. Реконструкция зонных энергий стандартного ПЛП-расчета в оксиде кальция	114

Наукове видання

ФОТО ЕЛЕКТРОНІКА

МІЖВІДОМЧИЙ НАУКОВИЙ
ЗБІРНИК

Випуск **11**

Здано у виробництво 28.03.2002. Підписано до друку 16.05.2002. Формат 60×84/8. Папір офсетний. Гарнітура Літературна. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 13,72. Тираж 300 прим. Зам. № 763.

Видавництво і друкарня «Астропринт»
(Свідоцтво ДК № 132 від 28.07.2000 р.)
65026, м. Одеса, вул. Преображенська, 24.
Тел.: (0482) 26-98-82, 26-96-82, 37-14-25.
www.astroprint.odessa.ua