ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ФОТОЧУВСТВИ-ТЕЛЬНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ ДИОДОВ Au-n-Ge

Ю. А. ДОБРОЖАНСКИЙ, В. А. ПРЕСНОВ, В. И. СТРИХА

Описаны результаты исследования изменения величины фоточувствительности поверхностно-барьерных диодов Au-n-Ge при изменении электрического поля в слое объемного заряда. Концентрация электронов в исходном германии составляла $2 \cdot 10^{14} \div 1, 2 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Величина электрического поля в слое объемного заряда изменялась от $0, 6 \cdot 10^6$ до $2, 6 \cdot 10^7$ в/м. Зависимость фоточувствительности от электрического поля объясняется изменением коэффициента оптического поглощения в германии и ширины слоя объемного заряда для энергии фотона $\hbar \omega < 1$ эв и изменением квантового выхода внутреннего фотоэффекта в германии для энергии фотона $\hbar \omega > 1$ эв.

Поверхностно-барьерный диод (ПБД) Au-n-Ge с полупрозрачным золотым электродом обладает хорошей чувствительностью к поглощаемому свету с рабочим пределом до 2 *мкм*. ПБД с малой высотой потенциального барьера ($\varphi_B \leq 0.5$ эв) обладают большой крутизной барьера при нулевом смещении, что обеспечивает лучшую чувствительность фотодиода при регистрации сигналов малого уровня мощности. Поэтому исследование фоточувствительности α , как основного параметра ПБД, является важным вопросом.

Целью данной работы было исследование влияния величины электрического поля E_m в слое объемного заряда (СОЗ) на относительную фоточувствительность ПБД Au-*n*-Ge в диапазоне энергий фотонов $\hbar \omega = 0.7 \div 3.0$ эв.

Образцы для исследования и методика эксперимента

Для изготовления ПБД был применен германий электронной проводимости, легированный сурьмой с концентрацией электронов $Nd = 2 \cdot 10^{14} \div 1,2 \cdot 10^{17}$ см⁻³. В зависимости от концентрации электронов подвижность составляла $0.9 \div 3.9 \cdot 10^5 \ m^2/s$ сек. Пластины Ge имели толщину 300 мкм с ориентацией [111]. Для создания омических контактов к германию был применен сплав олова с сурьмой, который вплавлялся в химически очищенный германий в среде водорода при температуре 500°C в течение 3 мин.

Перед нанесением золота пластины Ge шлифовались и полировались механически, а затем, после обезжиривания, травились в полирующем травителе СР-4А в течение 4 мин. Сушку образцов проводили в вакуумной установке, в которой затем на них наносился золотой полупрозрачный электрод. Осаждение пленок золота на пластины германия проводилось путем испарения его в вакууме ниже $5 \cdot 10^{-5}$ тор. Для предотвращения попадания в вакуумную систему установки паров масла использовалась азотная ловушка. В процессе напыления пленки золота температура пластинок поддерживалась равной 120°С. Этим устранялась возможность конденсации паров, которые в какой-то мере присутствуют в вакуумных системах с масляным насосом.

Осаждение золота проводилось через металлический трафарет, размер окон в котором был 1,5×3 мм². Пленки золота имели толщину 100÷300 Å. Скорость напыления составляла 3÷4 Å/сек. При монтаже образцов соединение утолщенной части пленки золота с выводящим электродом осуществлялось с помощью акводага, либо с помощью напайки индием.

Для исследования фоточувствительности изготовленных образцов ПБД применялся монохроматор ИКС-12, в котором было повернуто зеркало Литерова на угол, обеспечивающий получение на выходе монохроматических лучей в диапазоне энергий $\hbar\omega = 0,5 \div 3,1$ эв. В качестве источника света была применена лампа марки КГМ-12-100, световой поток которой модулировался с частотой 120 ги. Свет падал на поверхность образца со стороны полупрозрачной золотой пленки. Для исключения краевых эффектов применялась диафрагма. Мощность падающего светового потока в исследуемой области спектра измерялась с помощью вакуумного термостолбика URSt-5/7 с чувствительностью 4,5 · 10-5 в м²/вт и термоэлектрического актинометра AT-50 с чувствительностью 9,19.10-6 в м²/вт. Величина фототока измерялась с помощью селективного микровольтметра В6-4т (либо У2-6) и электронного вольтметра ВК7-10А/1. При необходимости при измерениях применялось синхронное детектирование. В процессе измерений обращалось внимание на то, чтобы дифференциальное сопротивление (R ,) ПБД было значительно больше сопротивлений нагрузки и контактов образца, что исключало неточности в исследовании из-за изменения R в сильных полях. Для этого сопротивление нагрузки (R_н) выбиралось таким, чтобы при его уменьшении отношение- $J_{\phi}(U)/J_{\phi}(0)$ было постоянным. В нашем случае $R_{\rm H} = 11$ ом, а $R_{\rm A} > 1$ ком. Все измерения проведены при 80°К.

Результаты исследования и их обсуждение

Все исследуемые образцы ПБД имели почти идеальные вольт-емкостные (V—C) и вольт-амперные (V—A) характеристики, предсказываемые диодной теорией, которые описываются уравнением [1]

$$J = J_{s} [\exp(g V/nkT) - 1],$$
 (1)

где

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(\varphi_B / k T\right),$$

 A^* — постоянная Ричардсона (для германия $A^* = 50 \text{ Å/c} m^2 \text{ °K}^2$), n — коэффициент "идеальности", k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Величина n для наших образцов составляла 1,05±0,01. Некоторое отличие n от единицы может быть связано с наличием промежуточного слоя между пленкой Au и Ge и влиянием сил электрического изображения, понижающего потенциальный барьер (φ_B). Величина φ_B была определена из 4—638 392

С-V и V-A характеристик и составляла 0,48±0,02 эв для ПБД Аи-п-Ge с концентрацией электронов в германии 1,5 · 10¹⁵ см⁻³, что находится в согласии с работами [2, 3].

С увеличением концентрации электронов до 1,2·10¹⁷ см⁻³ величина Фв уменьшается на 16%. Аналогичная закономерность была обнаружена на ПБД Аи-п-Ge авторами работ [4, 5]. Это явление связано, в основном, с влиянием сил электрического изображения. С увеличением концентрации уменьшается толщина потенциального барьера, возрастает вероятность туннелирования электронов сквозь барьер к металлическому электроду [6]. Спектральное распределение относительного изменения фоточувствительности $J_{\phi}(U)/J_{\phi}(0)$ при различных напряжениях смещения для одного из исследованных образцов с концентрацией электронов в Ge Nd = 2 · 10¹⁴ см⁻³ показано на рис. 1.





Рис. 1. Спектральное распределение относительного изменения фоточувствительности $J_{\oplus}(U)/J_{\oplus}(0)$ ПБД Au-n-Ge с $Nd = 2 \cdot 10^{14}$ см⁻³, $t_{Au} = 215$ Å при различных напряженностях электрического поля Ет в/м в слое объемного заряда: $1 - 6 \cdot 10^5$, $2 - 6, 6 \cdot 10^5$, $3 - 8, 2 \cdot 10^5$, $4 - 1, 6 \cdot 10^6$, $5 - 2, 2 \cdot 10^6$, $6 - 3 \cdot 10^6$, $7 - 3, 7 \cdot 10^6$, 8-4,3.106, 9-4,8.106, 10 - коэффициент оптического поглощения света в германии K (см⁻¹) [12].

В области спектра с $\hbar \omega = E_g$ наблюдается резкое возрастание величины $J_{\phi}(U)/J_{\phi}(0)$ с ростом энергии фотона. Это связано с началом генерации носителей тока в слое объемного заряда и с изменением под влиянием напряжения смещения толщины W.

В области h w = 0,69÷1,0 эв наблюдаются осцилляции и уменьшение величины отношения $J_{\phi}(U)/J_{\phi}(0)$, что происходит из-за изменения оптического поглощения в полупроводнике и толщины слоя объемного заряда W в меняющемся электрическом поле. Увеличение отрицательного смещения приводит к возрастанию отношения $\int_{\phi} (U) / \int_{\phi} (0)$, т. е. к возрастанию фототока $\int_{\phi} (U)$, что соответствует выражению [7]

$$J_{\Phi}(U) = A\left[\int K(x) dx + K_0 L_p\right], \qquad (2)$$

где А—величина, зависящая от плотности потока фотонов, коэффициента отражения света и от площади полупрозрачного Аи-электрода, K(x) коэффициент поглощения света в слое объемного заряда, зависящий от величины электрического поля, K_0 — коэффициент поглощения света в полупроводнике без поля, L_p — диффузионная длина неосновных носителей тока, W — толщина слоя объемного заряда.

Уменьшение величины $J_{\phi}(U)/J_{\phi}(0)$ с ростом энергии фотонов в области $\hbar \omega = 0.83 \div 1.0$ эв вызвано уменьшением относительно величины Wглубины поглощения в полупроводнике из-за возрастания коэффициента оптического поглощения K. Поэтому изменение величины W с напряжением смещения уже не влияет на фоточувствительность α и отношение $J_{\phi}(U)/J_{\phi}(0)$ с ростом K должно стремиться к единице, что мы и наблюдаем при

 $\hbar\omega \simeq 1$ эв.

Изменение относительной фоточувствительности с напряжением в области энергий фотонов ħω>1 эв связано с изменением квантового выхода внутреннего фотоэффекта за счет ударной ионизации [7], которая зависит от электрического поля в слое объемного заряда W.

Как показали экспериментальные результаты, ударная ионизация в области энергий фотонов $\hbar \omega > 1$ эв наступает тогда, когда величина электрического поля превышает $1,2 \cdot 10^6 \ s/m$, что соответствует обратному смещению больше 4 в (рис. 1, кривые 5—9).

С изменением концентрации в исходных образцах Ge, которая влияет на толщину СОЗ, изменяется и предельное напряжение смещения начала ударной ионизации. Напряжение смещения существенно влияет и на величину потерь фоточувствительности a. На рис. 2 показано спектральное распределение a ПБД Au-n-Ge при разных напряжениях смещения.

Потери а могут быть, в основном, обусловлены потоком генерировалных в полупроводнике фотоэлектронов в сторону золотого электрода [8—10]. Очень малые времена релаксации горячих носителей в металле приводят к тому, что плотность электронов у поверхности металла, по существу, равна нулю. При генерации в СОЗ носителей заряда возникает градиент концентрации, который обуславливает диффузию фотоэлектронов в сторону металлического электрода, служащего стоком для них. Одновре-

менно силы электрического поля E_m в СОЗ направляют движение фотоэлектронов в сторону, противоположную золотому электроду. Поэтому при увеличении напряженности поля E_m потери а уменьшаются, а коэффициент собирания носителей стремится к единице. Кривые 1 и 2 на рис. 2 изображают спектральное распределение абсолютной фоточувствительности а (эл/фотон) без напряжения смещения и величины доли падающего излучения, прошедшего через золотую пленку в



Рис. 2. Спектральное распределение фоточувствительности α в ПБД Au-n-Ge с напряжением обратного смещения $U_{0\delta p}$: 1, 2, 3 — спектры фоточувствительности (отн. ед.) при $U_{0\delta p} = 1s$, 10s, 25s для образца Au-n-Ge с

 $Nd = 6 \cdot 10^{15} \ cm^{-3}$ и толщиной золотого электрода $t_{Au} = 110 \ \text{Å}$; 4 – вычисленная величина доли излучения T_1 , прошедшего в Ge сквозь пленку Au ($t_{Au} = 130 \ \text{Å}$); 5 – экспериментально измеренная абсолютная фоточувствительность α (эл/фотон) для образца с концентрацией электронов в Ge Nd = $2 \cdot 10^{15} \ cm^{-3}$, $t_{Au} = 130 \ \text{Å}$; 6 – коэффициент оптического поглощения пленок золота K (cm^{-1}) [11].

полупроводник— T_1 . В области энергий, где соблюдаются условия KW > 1, $KL \gg 1$, величина $\alpha \simeq T_1\beta$, где β — квантовый выход внутреннего фотоэффекта. Отличие α^3 экспериментального (1) и теоретического (2) $(a^T \rightarrow T_1)$ значений говорит о существовании в образце потерь фоточувствительности.

Относительное изменение фоточувствительности с изменением величины электрического поля E_m в СОЗ при определенных значениях энергии фотона показано на рис. 3. С возрастанием величины электрического поля E_m и энергии фотона увеличивается значение относительной фоточувствительности, которое для напряжения смещения, большего 4 в, связано, в основном, с изменением квантового выхода внутреннего фотоэффекта [7].

При энергии фотона $\hbar \omega = 3$ эв для ПБД с концентрацией электронов в германии $Nd = 6 \cdot 10^{15}$ см⁻³ (кривая 1) и $Nd = 2 \cdot 10^{14}$ см⁻³ (кривая 2) величина $\alpha(U)/\alpha(0)$ возрастает начиная с $E_m \ge 0.5 \cdot 10^7$ в/м. С увеличением напряженности электрического поля до $2 \cdot 10^7$ в/м (кривая 1), а также до $2.5 \cdot 10^7$ в/м (кривая 2) наблюдается резкое возрастание величины относительного изменения фоточувствительности $\alpha(U)/\alpha(0)$. Данное явление может быть связано, в основном, с изменением квантового выхода внутреннего фотоэффекта в Ge, обусловленным ударной ионизацией, начало которой зависит от величины электрического поля в слое объемного заряда, а также от энергии падающих фотонов (кривая 3, $\hbar\omega = 2.6$ эв).



Рис. 3. Зависимость относительной фоточувствительности $\alpha(U)/\alpha(0)$ от величины напряженности электрического поля Ет в слое объемного заряда ПБД Аи-п-Ge для определенных величин энергии фотонов: а) образец с $Nd = 6 \cdot 10^{15} cm^{-3}$, $t_{Au} = 110$ Å; $1 - \hbar\omega = 3$ 98, $4 - \hbar\omega = 0,85$ 98, $5 - \hbar\omega = 1$ 98; 6) образец с $Nd = 2 \cdot 10^{14} cm^{-3}, t_{Au} = 215 \text{ Å}; 2 - \hbar\omega = 3 38, 3 - \hbar\omega = 2,6 38.$

Характер изменения $\alpha(U)/\alpha(0)$ для $\hbar \omega = 0.85$ эв (кривая 4, Nd ==6·10¹⁵ см⁻³) обусловлен изменением коэффициента оптического поглощения К и толщины СОЗ W с изменением напряженности электрического поля Em. Изменение a(U) во всем исследуемом диапазоне спектра энергий может быть связано и с перезаполнением поверхностных состояний, принимающих участие в переносе фотоносителей.

Таким образом, зависимость фоточувствительности ПБД Аи-п-Ge от величины электрического поля в СОЗ связана с изменением коэффициента оптического поглощения К в германии и ширины СОЗ W для области спектра с энергией фотонов ħω<1 эв, а также с изменением квантового выхода внутреннего фотоэффекта в германии для энергий фотонов ħω>1 эв.

Одесский государственный университет

Поступила 20.1.1975

ЛИТЕРАТУРА

1. C. A. Mead. Sol.-St. Electron., 9, 1023 (1969). 2. H. Jager, W. Kosak. Sol.-St. Electron., 12, 511 (1969). 3. A. Thanailakis, D. Nothrep. Sol.-St. Electron., 16, 12 (1973). 4. R. J. Archer, M. M. Atalla. Ann. N. V. Acad. Sci., 101, 697 (1963). 5. D. Kahng. Sol.-St. Electron., 6, 281 (1963). 6. J. M. Gaywood, C. A. Mead. Appl. Phys. Lett., 15, 14 (1969). 7. А. А. Гуткин, М. В. Дмитриев, Д. Н. Наследов. ФТП, 4, 282 (1970). 8. R. D. Baertsch, J. R. Richardson. J. Appl. Phys., 40, 229 (1969). 9. А. М. Васильев и др. ФТП, 3, 1276 (1969).

10. E. J. Rhoderick. J. Phys. Opt. Appl. Phys., 3, 1153 (1970). 11. R. B. Johnson, R. W. Chricty. Phys. Rev., 6, 4370 (1972). 12. H. R. Philipp, E. A. Taft. Phys. Rev., 113, 1002 (1959).

ելեկջրԱկԱՆ ԴԱՇՏԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ Au-n-Ge ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԱ-ԱՐԳԵԼԱԿԱՅԻՆ ԴԻՈԴՆԵՐԻ ՖՈՏՈԶԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Յու. Ա. ԴՈԲՐՈԺԱՆՍԿԻ, Վ. Ա. ՊՐԵՍՆՈՎ, Վ. Ի. ՍՏՐԻԽԱ

նկարագրվում են ծավալային լիցքի շերտում էլեկտրական դաշտի փոփոխման ժամանակ տեղի ունեցող Au-n-Ge մակերևույթա-արգելակային դիոդների ֆոտոզդայնության փոփոխման Տետաղոտության արդյունքները։

THE EFFECT OF ELECTRIC FIELD ON THE PHOTOSENSITIVITY OF SURFACE-BARRIER DIODES IN Au-n-Ge

Yu. A. DOBROZHANSKIJ, V. A. PRESNOV, V. I. STRIKHA

The variation of photosensitivity of surface-barrier diodes in Au-n-Ge at the variation of electric field in a space charge layer was investigated and the results are given. The electric field in the space charge layer was changed from 0,6.106 to $2,6\cdot 10^7 V/m$. The electric field dependence of photosensitivity is explained by the change of both the optical absorption coefficient in Ge and the space charge layer width at photon energy $\hbar\omega < 1.0 \ eV$ as well as the change of a quantum yield of internal photoeffect in Ge at photon energy $\hbar \omega > 1,0 \ eV$.

and provide the second state of the second sta