

УВЕЛИЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОРЕЗИСТОРОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ирха В.И., Ирха Ю.В., Шишкова С.И.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная,1.*

phys@onat.edu.ua

ЗБІЛЬШЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ФОТОРЕЗИСТОРІВ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

Ирха В.И., Ирха Ю.В., Шишкова С.И.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська,1.*

phys@onat.edu.ua

INCREASING OF PHOTORESISTORS SENSITIVITY IN THE MAGNETIC FIELD

Irkha V.I., Irkha Yu.V., Shyshkova S.I.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kovalska St., Odessa, 65029, Ukraine.*

phys@onat.edu.ua

Аннотация. Рассматриваются возможности и физические принципы увеличения чувствительности фоторезисторов. Даны основные теоретические соотношения, определяющие их параметры. Показано, что основным путем увеличения чувствительности фоторезисторов является увеличение подвижности и эффективного времени жизни генерированных светом носителей заряда. Помещение фоторезистора в магнитное поле, направленное перпендикулярно электрическому току и световому потоку, увеличивает фоточувствительность в несколько раз.

Ключевые слова: фоторезистор, фоточувствительность, магнитное поле, время жизни, подвижность, эффект Холла.

Анотация. Розглядаються можливості та фізичні принципи збільшення чутливості фоторезисторів. Надані основні теоретичні співвідношення, що визначають їх параметри. Показано, що основним шляхом збільшення чутливості фоторезисторів є збільшення рухливості та ефективного часу життя генерованих світлом носіїв заряду. Розміщення фоторезистора в магнітне поле, направлене перпендикулярно електричному струму та світловому потоку, збільшує фоточутливість у декілька разів.

Ключові слова: фоторезистор, фоточутливість, магнітне поле, час життя, рухливість, ефект Холла.

Abstract. Possibilities and physical principles of increasing of sensitivity of photoresistors we considered. The basic theoretical relations, which describe the parameters of photoresistors are resulted. It is shown, that the main way of magnification of sensitivity of photoresistors is the increasing of mobility and effective lifetime of the charge carriers generated by light. The photoresistor location in the magnetic field that directed perpendicularly to the electric current and a luminous flux increases photosensitivity in several times.

Key words: photoresistor, photosensitivity, magnetic field, lifetime, mobility.

Полупроводниковые фотоприемники являются одним из первых приборов, где полупроводники нашли свое практическое применение. Опубликовано большое количество работ, посвященных созданию, изучению и увеличению чувствительности фотоприемников, в том числе и фоторезисторов. В настоящее время диапазон использования фотоприемников простирается от бытовой техники до космических аппаратов. Главной задачей, решаемой с

помощью фотоприемников, является обнаружение слабых световых сигналов. Она наиболее существенна для астрономии, систем наведения и систем оптической связи, где световой сигнал распространяется по оптическому волокну. Очевидно, чем выше чувствительность фотоприемника, тем на большем расстоянии может быть обнаружен световой сигнал.

Цель данной статьи – определение возможности увеличения чувствительности фоторезистора путем помещения его в перпендикулярное направлению светового потока Φ и тока магнитного поля.

Наиболее перспективным направлением в повышении чувствительности является разработка физических методов увеличения чувствительности фотоприемников путем целенаправленного выбора электрофизических характеристик материала фотоприемника. Рассмотрим пути повышения чувствительности фоторезисторов и инжекционных фотодиодов.

Фоторезистор представляет собой полосу из монокристаллического или пленочного полупроводника с омическими контактами на концах. При его освещении светом с интенсивностью I проводимость изменяется на величину

$$\Delta\sigma_{\phi} = q\alpha\beta I(\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p), \quad (1)$$

называемую фотопроводимостью, где q – заряд электрона; α – коэффициент поглощения света; β – квантовый выход; $\mu_{n,p}$ – подвижности электронов и дырок; $\tau_{n,p}$ – их эффективные времена жизни.

Чувствительность фоторезисторов характеризуется следующими параметрами [2]. Если напряжение на фоторезисторе поддерживать постоянным, то ток через него растет с увеличением светового потока Φ . Отношение фототока к световому потоку называется токовой фоточувствительностью S_i , которая измеряется в А/Лк или А/Вт.

$$I_{\phi} = \Delta\sigma_{\phi}SE = \Delta\sigma_{\phi}SU_0/\ell. \quad (2)$$

В (2) S – площадь поперечного сечения фоторезистора; U_0 – напряжение на нем; ℓ – длина. Если же поддерживать постоянным ток через фоторезистор, то при освещении меняется падение напряжения на нем U_{ϕ} . В этом режиме используется вольтовая чувствительность S_u , равная отношению U_{ϕ} к световому потоку.

Способность фоторезистора регистрировать слабые световые потоки Φ характеризуется пороговой чувствительностью P_{Π} и обнаружительной способностью

$$D^* = U_{\phi} \sqrt{S\Delta f} / U_e \Phi, \quad (3)$$

где P_{Π} определяет уровень мощности светового потока, при котором сигнал равен шуму; U_{ϕ} – напряжение фотосигнала; U_e – напряжение шума фоторезистора; S – площадь его фоточувствительной площадки; Δf – полоса частот.

Каждый поглощенный квант света вызывает протекание через контакты носителей заряда, число которых

$$G = \frac{\tau}{t_{\Pi}} = \mu\tau \frac{U_0}{\ell^2}, \quad (4)$$

где $t_{\Pi} = \ell/v$ – время пролета носителей между контактами; $v = \mu v_0/\ell$ – их скорость. Величина G называется коэффициентом фотоэлектрического усиления. Нетрудно определить, что I_{ϕ} и U_{ϕ} прямо пропорциональны G , а значит все параметры, характеризующие чувствительность S_i , S_u и D^* , также пропорциональны G . Следовательно, основным путем увеличения чувствительности фоторезисторов является увеличение подвижности и эффективного времени жизни генерированных светом носителей заряда (4). Обе эти величины существенно связаны с состоянием поверхности полупроводника, характеризуемой скоростью поверхностной рекомбинации s [3]. Поверхностные центры увеличивают рассеяние носителей, что приводит к уменьшению μ , но в еще большей степени увеличивают их рекомбинацию, что уменьшает τ , эти эффекты наиболее значительно проявляются в тех фоторезисторах, где генерация носителей происходит в

приповерхностном слое и носители движутся к контактам вдоль поверхности [4]. В отсутствие света и магнитного поля ($\Phi = 0, B = 0$) электрический ток I протекает от левого контакта к правому и электрическое поле E_I направлено так же. При освещении светом, поглощающим вблизи верхней поверхности, возникающие носители заряда движутся также вблизи поверхности в направлении E_I . Рекомбинация носителей на поверхности при этом значительна, что приводит к невысокому значению τ и малой чувствительности.

Если в отсутствие света ($\Phi = 0$) включено магнитное поле с индукцией B , то сила Лоренца отклоняет основные носители (электроны) к нижней поверхности и в полупроводнике возникает холловское электрическое поле E_x . Соответственно, вектор результирующего электрического поля E оказывается повернутым на угол φ относительно вектора E_I , причем [1].

$$\operatorname{tg}\varphi = E_x/E_I = \mu B. \quad (5)$$

При включении света генерированные им неосновные носители (дырки) движутся в направлении E , т.е. удаляются от поверхности, что приводит к уменьшению рекомбинации на ней и увеличению τ .

Таким образом, суть эффекта состоит в том, что магнитное поле отклоняет генерированные светом носители от поверхности, что увеличивает их эффективное время жизни и чувствительности фоторезистора.

Структура фоторезистора из полупроводника n – типа проводимости показана на рис. 1, где B – индукция магнитного поля.

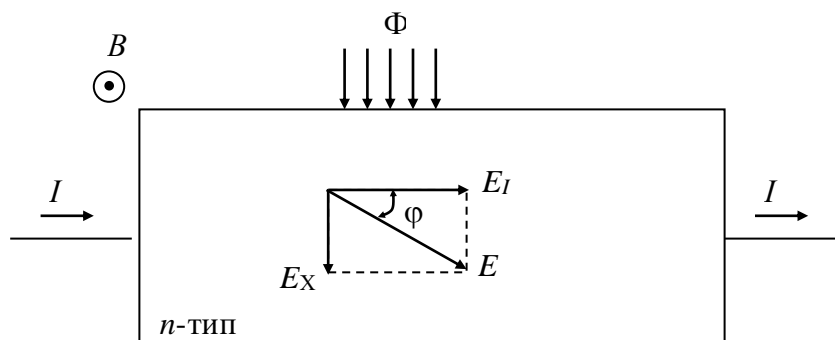


Рисунок 1 – Структура фоторезистора в магнитном поле

Как следует из изложенного, эффект увеличения фоточувствительности будет тем выше, чем больше разница между скоростью рекомбинации на поверхности, где она ниже. Поскольку скорость объемной рекомбинации обратно пропорциональна объемному времени жизни τ_0 , то для эксперимента необходим материал с большим временем жизни неосновных носителей. Таким материалом является германий с проводимостью, близкой к собственной, где τ_0 может достигать нескольких миллисекунд. Поэтому экспериментальные фоторезисторы изготавливались из германия n – типа с $\rho = 40$ Ом·см размером 1x1x5 мм. Омические контакты изготавливались вплавлением в вакуумной печи олова. Темновое сопротивление R_T для различных образцов находилось в пределах 1,3...2,0 кОм. Для освещения использовалась обычная лампа накаливания с фильтром, пропускающим видимый свет.

Эффективное время жизни экспериментально определялось по времени переключения p - n -перехода из прямого направления в обратное. Для этой цели рядом с омическим контактом вплавлялся индий, образующий p^+ - n -переход. После вплавления контактов образцы обрабатывались в перекиси водорода. Для различных образцов τ находилось в пределах 60 ... 145 мкс, а значение s в пределах 70 ... 400 см/с.

В эксперименте исследовалась зависимость фототока при постоянной интенсивности света от индукции магнитного поля, направленного согласно рис. 1. При $B = 0$ и напряжении 2,5 В темновой ток составляет 1,5 мА. Слабое освещение интенсивностью Φ несколько мкВт/см² увеличивает ток до 1,537 мА, т.е. фототок составляет $I_{\Phi} = 37$ мкА. При включении магнитного поля с индукцией $B = 0,2$ Тл темновой ток уменьшается до 1,49 мА (магниторезистивный эффект). При освещении образца светом той же величины ток увеличивается до 1,565 мА, следовательно величина фототока 75 мкА. Таким образом, помещение фоторезистора в магнитное поле (указанного направления) при неизменном световом потоке увеличивает фототок, а значит и фоточувствительность в несколько раз.

На рис. 2 показана зависимость фототока от величины магнитного поля. С ростом B фототок при $B = 0,2 \dots 0,3$ Тл достигает насыщения, что связано с тем, что при больших E_x генерированные светом на верхней поверхности дырки достигают нижней поверхности, где скорость рекомбинации выше и увеличение фототока прекращается. Естественно, что в зависимости от размеров образца и скорости поверхностной рекомбинации насыщение будет происходить при различных значениях магнитного поля.

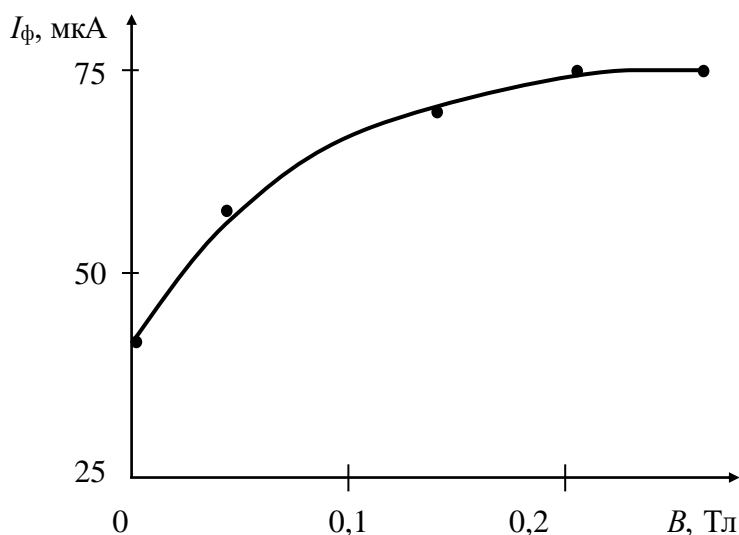


Рисунок 2 – Зависимость фототока фоторезистора от индукции магнитного поля

К настоящему времени опубликовано большое количество работ по расчету фототока фоторезисторов при всех возможных граничных условиях. В нашем случае (весь свет поглощается на поверхности, $d < L_p$) подходит формула для фототока [4] через n – полупроводник, в простом виде записываемая как

$$I_{\Phi} = \frac{I_0}{2 \frac{s\tau_p}{d} + \frac{s^2\tau_p^2}{L^2} + 1}, \quad (6)$$

где в знаменателе оставлены параметры, которые могут зависеть от магнитного поля.

Если считать, что при включении магнитного поля увеличивается только глубина затягивания носителей в глубь полупроводника L , то расчет фототока по (6) для образца с $s = 385$ см/с дает увеличение фототока от 37 до 47 мкА, что значительно меньше экспериментальной величины 75 мкА. Следовательно, кроме увеличения L_p в магнитном поле должен существовать еще один механизм увеличения фототока. Таким механизмом может быть уменьшение рекомбинации генерированных светом носителей на самой поверхности, где поглощается свет.

Как отмечено выше, в отсутствие магнитного поля свет поглощается на глубине до 2...3 мкм от поверхности, где также расположены центры поверхностной рекомбинации, поэтому значительная часть генерированных носителей сразу же рекомбинирует и в фототоке не участвует. При помещении фоторезистора в магнитное поле возникает холловское электрическое поле, затягивающее генерированные носители вглубь полупроводника, т.е. отводит их от центров поверхностной рекомбинации. Следовательно, эффективность рекомбинации носителей на поверхности падает, что и приводит к росту фототока и фоточувствительности. Экспериментальное измерение зависимости скорости поверхностной рекомбинации от магнитного поля показало, что действительно при данных условиях эффективное значение $s = 385$ см/с при $B = 0$ уменьшается до $s = 220$ см/с при $B = 0,2$ Тл. Подстановка этой величины в (6) дает рассчитанную величину фототока, хорошо совпадающую с экспериментальным значением 75 мкА.

Таким образом, при помещении фоторезистора в магнитное поле, направленное перпендикулярно электрическому току и световому потоку (см. рис. 1), происходит увеличение эффективного времени жизни генерированных светом носителей заряда, что обеспечивает увеличение фототока и фоточувствительности в несколько раз.

В заключение можно сказать следующее: рассмотренный способ увеличения фоточувствительности существенен лишь в полупроводниках с большим объемным временем жизни, поэтому его имеет смысл применять для фоторезисторов из германия, кремния и антимонида индия, где τ_0 достигает величин в сотни микросекунд.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
2. Ирха В.И. Физические принципы увеличения чувствительности фоторезисторов и фотодиодов / В.И. Ирха, П.Ю. Марколенко // 69 науч-техн. конф. ОНАС им. А.С. Попова, 3-5 декабря 2014: тезисы докл. – Одесса, 2014. – Ч.II. – С. 14-16.
3. Пека Г.П. Физические явления на поверхности полупроводников / Пека Г.П. – К.: Вища шк., 1984. – 214 с.
4. Смит Р. Полупроводники / Смит Р. – М.: Мир, 1982. – 562 с.

REFERENCES :

1. Vikulin I.M. Physics of semiconducting devices/ I.M. Vikulin, V.I.Stafeev. – M.: Radio and communication, 1990. – 264 p.
2. Irkha V.I. Physical principles of increasing of sensitivity of photoresistors and photodiodes / V.I. Irkha, P.Y.Markolenko // Proceedings of 69 scientific-techn. conf. ONAC named by A.S.Popova, 3-5 Decem., 2014. – Odessa, 2014. – N.11. – P. 14-16.
3. Peka G.P. Physical appearances on a surface of semiconductors / Peka G.P. – K.: High school, 1984. – 214 p.
4. Smitt R. Semiconductors / Smitt R. – M.:World, 1982. – 562 p.