

УДК 517.9

Кинетика фотопроводимости при межзонном возбуждении с учетом поверхностной рекомбинации

© С. М. Мурюмин¹, А. Е. Никишина², Е. В. Никишин³

Аннотация. Проведено теоретическое исследование кинетики фотопроводимости резистора с глубокими примесными центрами. Использовались параметры характерные для полупроводников A^2B^6 и A^3B^5 . Изучено влияние электрического поля и диффузии электронов и дырок к поверхностям на фоточувствительность резистора.

Ключевые слова: кинетика фотопроводимости, рекомбинационные центры, времена жизни электронов и дырок, A^2B^6 и A^3B^5 , поверхностная рекомбинация.

Кинетика фотопроводимости определяется механизмом рекомбинации неравновесных носителей заряда: межзонная рекомбинация, рекомбинация через локальные центры (рекомбинация Шокли – Рида), межзонная Оже – рекомбинация, безызлучательная экситонная рекомбинация, поверхностная рекомбинация [1]–[4]. Одна из важных особенностей полупроводников заключается в том, что их электрические и оптические свойства могут существенно зависеть от состояния поверхности и изменяться при различной ее обработке (шлифовке, травлении, изменении окружающей среды). Рекомбинация избыточных носителей тока на поверхности полупроводника приводит к истощению приповерхностных областей носителями заряда [5]. Некоторая часть большого числа энергетических состояний, возникающих на поверхности, может являться эффективными рекомбинационными ловушками. Это вызывает диффузию избыточных носителей тока из середины образца к активным поверхностям. Наличие локальных поверхностных уровней энергии приводит также к тому, что на поверхности образуется электрический заряд, т. е. появляются обогащенные или обедненные приповерхностные слои (электроны локализуются на самой поверхности кристалла). Влияние поверхности на кинетику электронных процессов принято характеризовать скоростью поверхностной рекомбинации (S_n, S_p) [6], и оно будет особенно сильно в случае тонких пластин и нитевидных образцов, имеющих большое отношение поверхности к объему [5]. В работе проведено теоретическое исследование влияния поверхностной рекомбинации на кинетику фотопроводимости полупроводника.

Нами были рассмотрены полупроводники n -типа малой толщины (ниже приведены рисунки для полупроводника, толщина которого 100 мкм) с параметрами характерными для широкозонных полупроводников типа A^2B^6 и A^3B^5 [7, 8] при продольном освещении. Наличие объёмного заряда внутри полупроводника не учитывалось. Это оправдано небольшими электрическими полями внутри полупроводника. Численными методами исследовалось уравнение непрерывности с учётом диффузии и дрейфа электронов:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - R + \frac{1}{e} \operatorname{div} j_n \quad (1)$$

где $j_n = en\mu_n E + D_n \frac{dn}{dx}$; $g = g_0 e^{-\alpha x}$.

Рассмотрены случаи, когда скорость рекомбинации свободных носителей изменяется по линейному ($R = \Delta n / \tau$) и по квадратичному закону ($R = \gamma \cdot \Delta n^2$).

¹ Доцент кафедры прикладной математики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск

² Аспирант кафедры прикладной математики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск; annikishina@yandex.ru

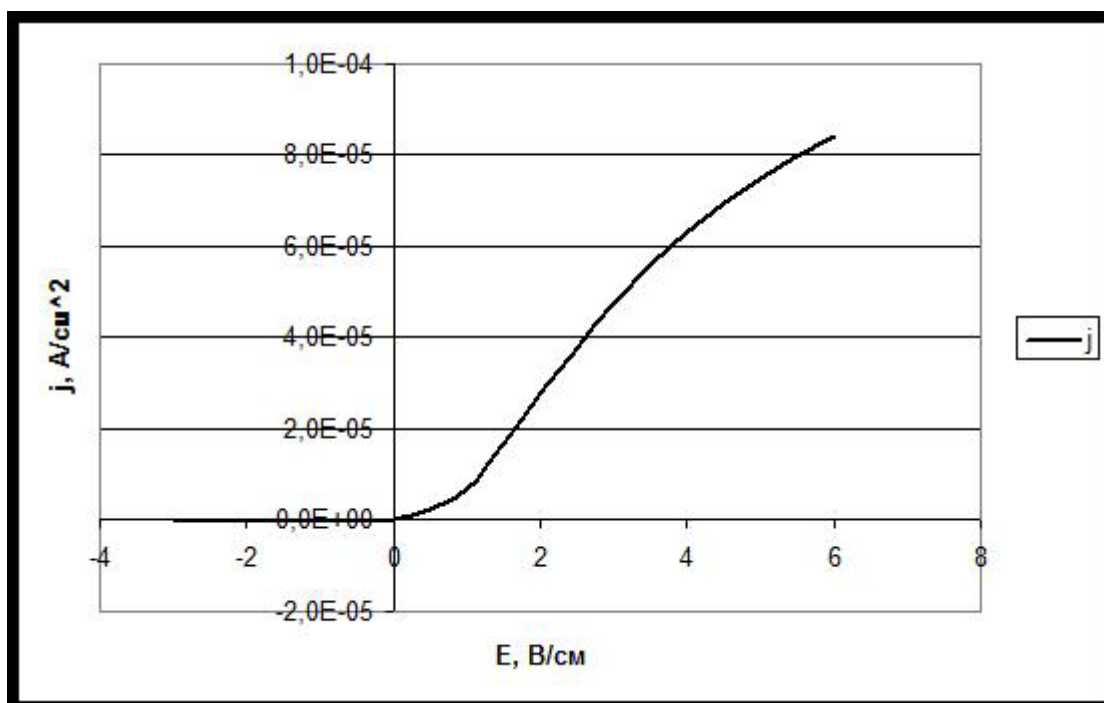
³ Доцент кафедры экспериментальной физики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск; nikishin57@mail.ru

Краевые условия определились через скорости поверхностной рекомбинации на границах S_1 и S_2 [5]:

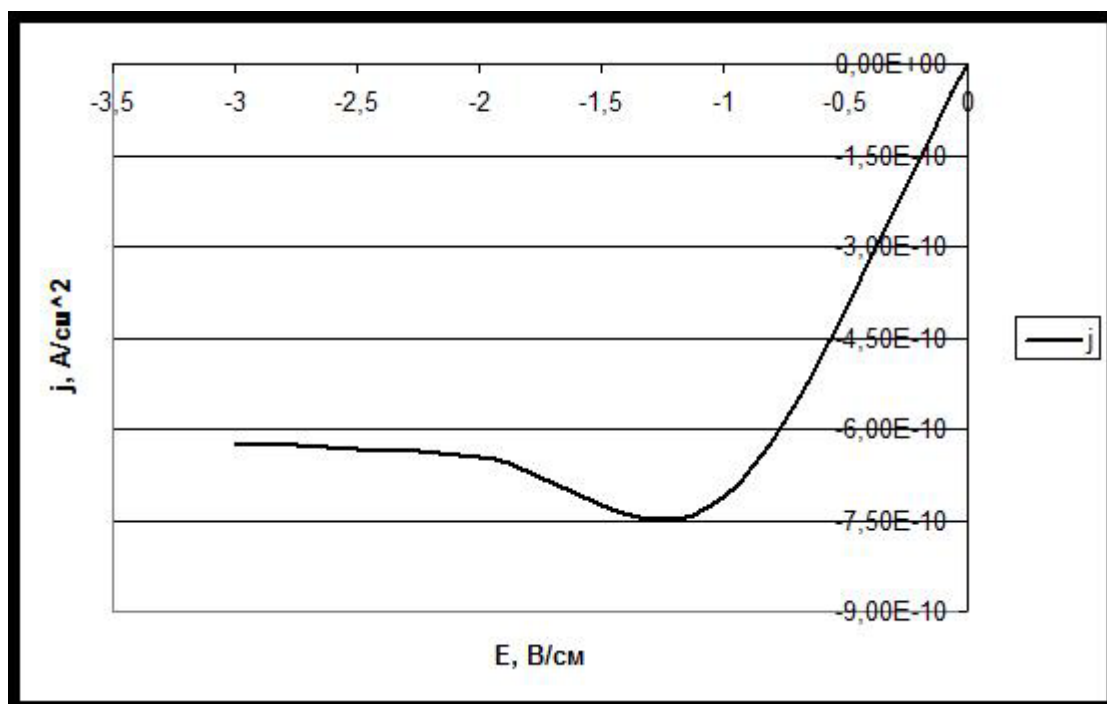
$$D \left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=0,t} = S_1 n \quad D \left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=d,t} = -S_2 n \quad (2)$$

Выбор начальных условий определялся законом объемной рекомбинации: при линейной рекомбинации – $n(0, x) = g\tau$; при квадратичной рекомбинации – $n(0, x) = \sqrt{g/\gamma}$.

На рисунках 1 – 2 представлены зависимости плотности тока от напряженности электрического поля в полупроводнике при продольном освещении для линейной рекомбинации неравновесных носителей заряда. Если хотя бы один из контактов обладает большой скоростью поверхностной рекомбинации, структура ведет себя подобно полупроводниковому диоду. Обратные токи на несколько порядков меньше токов, текущих в прямом направлении. Под прямым включением понимается случай, когда к освещенному контакту n -полупроводнику прикладывается «минус»; под обратным – «плюс». При прямом включении электроны выносятся полем из области генерации их светом в слабоосвещенную область. Этому способствует диффузия, возникающая из-за неоднородной генерации носителей заряда и рекомбинации их на границах. Вблизи контактов с большой скоростью поверхностной рекомбинации остаются небольшие участки с высоким сопротивлением. Они и определяют общее сопротивление такой структуры. При обратном включении электроны прижимаются полем к освещенному контакту. Сопротивление структуры резко возрастает. Если освещенный контакт имеет большую скорость поверхностной рекомбинации, то вблизи нее также присутствует область с малой электропроводностью. Сопротивление структуры меняется на несколько порядков и практически близко к сопротивлению неосвещенного полупроводника. На обратной ветви ВАХ при больших значениях S_2 возникают N -образные участки.

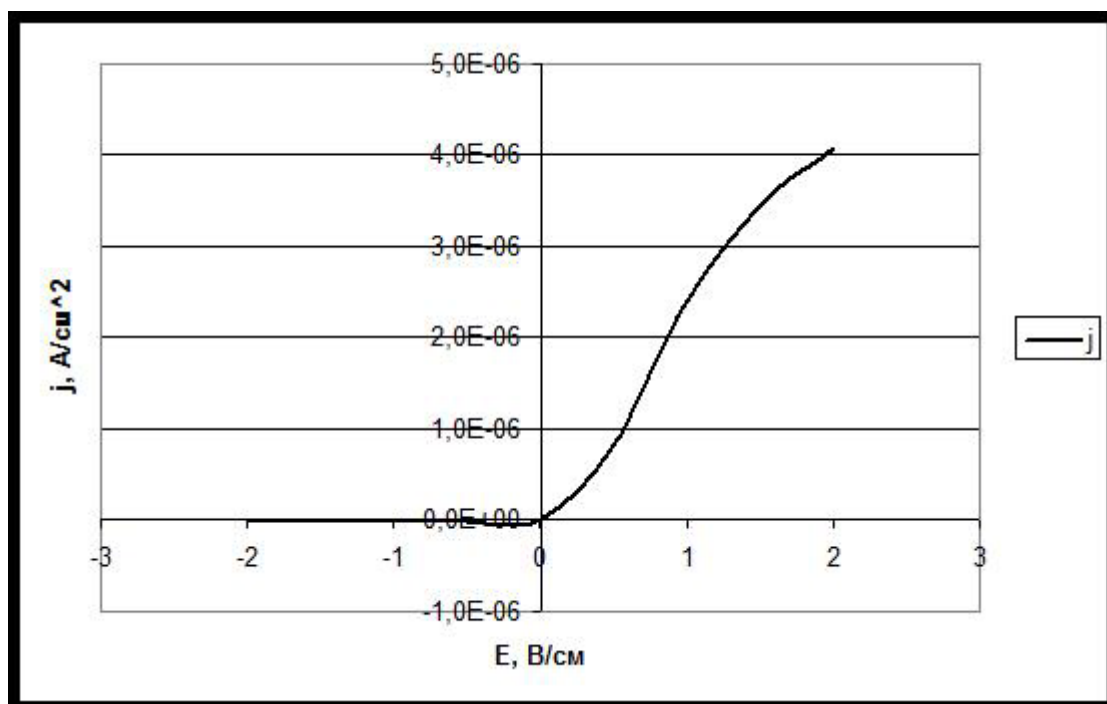


a)

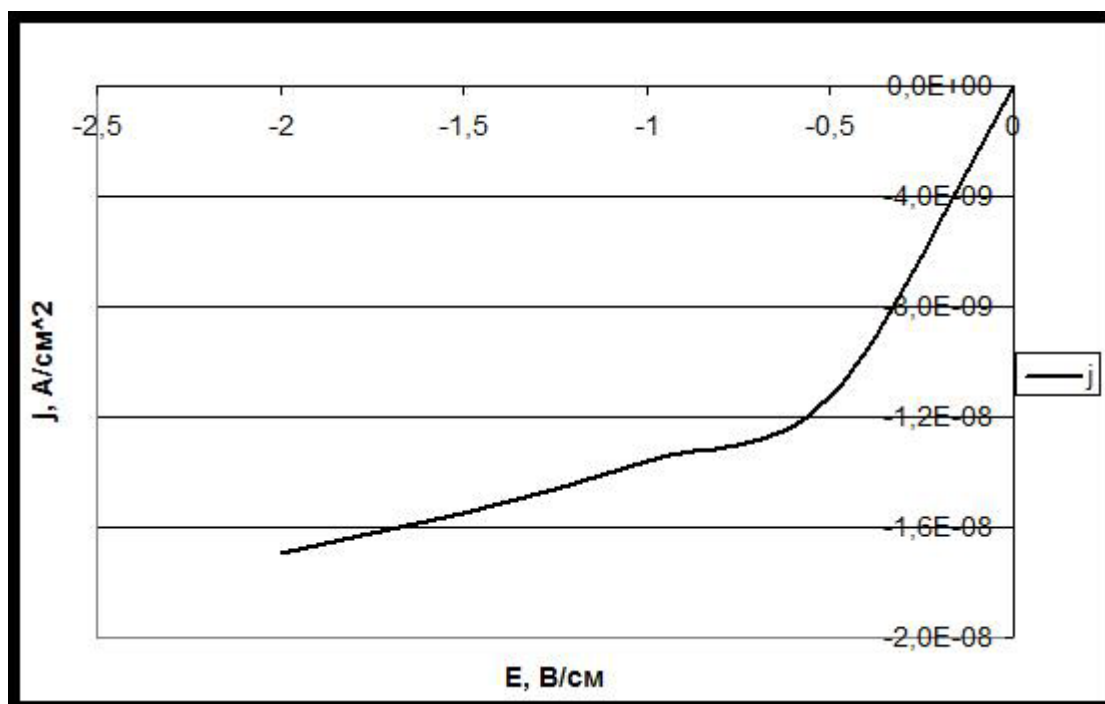


b)

Рис. 1 Зависимости плотности тока от напряженности электрического поля в полупроводнике при линейной рекомбинации (освещенный контакт – $S_1 = 1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ неосвещенный контакт – $S_2 = 10^3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, $\tau = 10^{-3} \text{ с}$, $g = 10^{15} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$): направление напряженности электрического поля для а) от освещенного контакта; б) к освещенному контакту.



a)

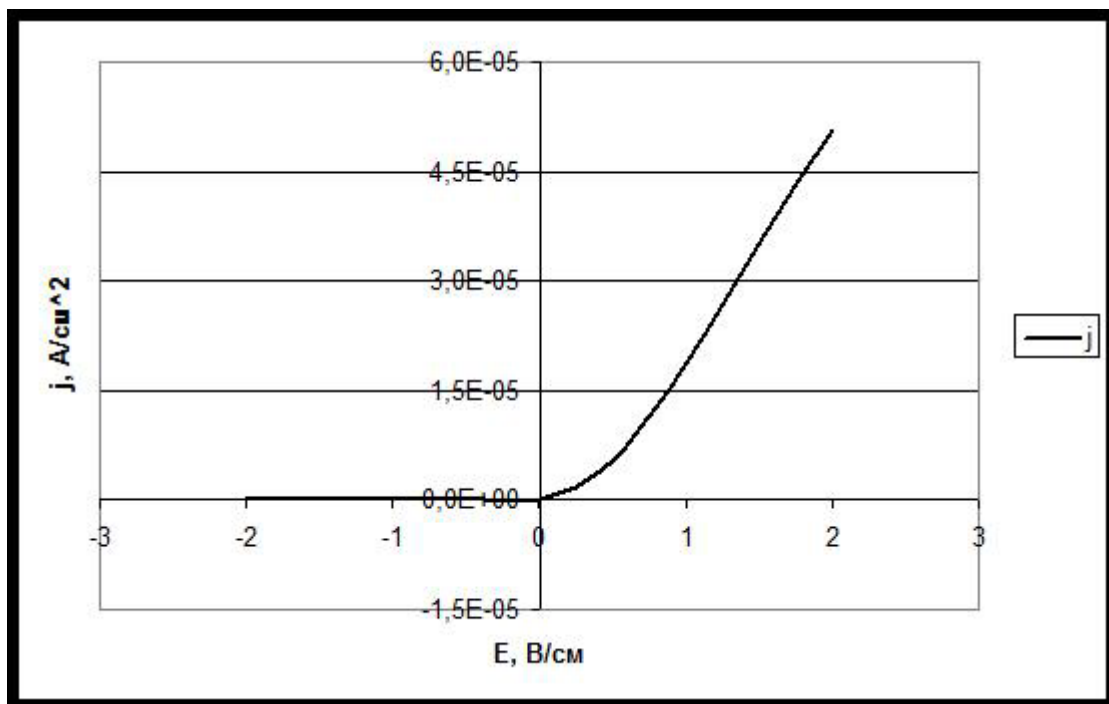


b)

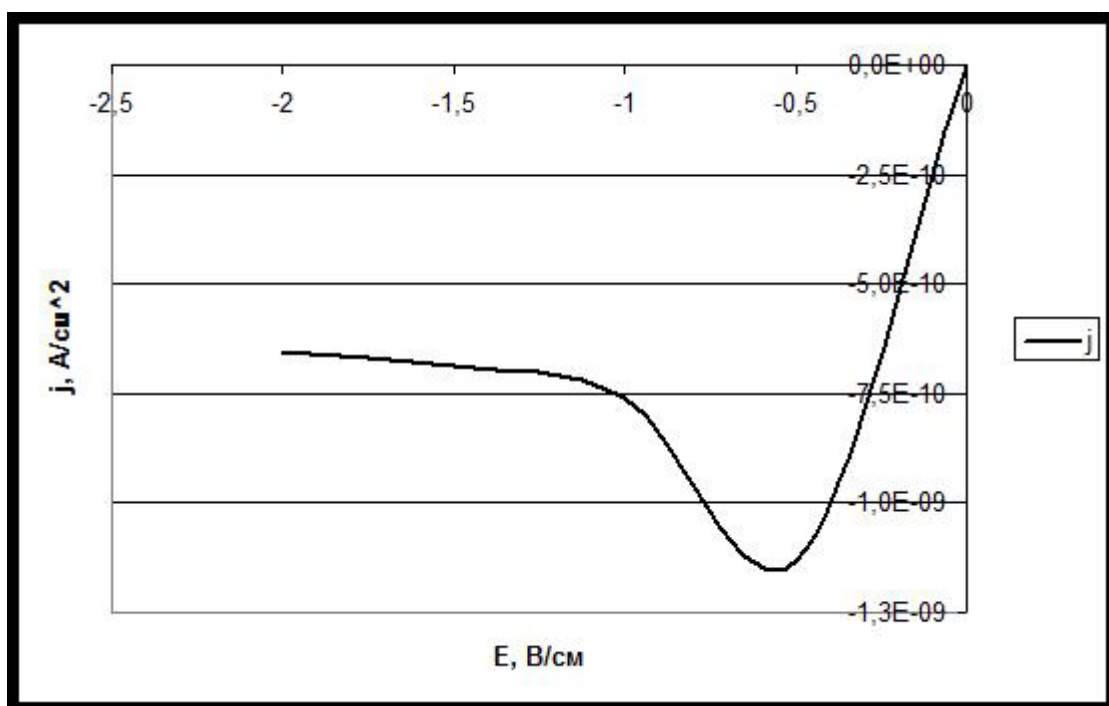
Рис. 2 Зависимости плотности тока от напряженности электрического поля в полупроводнике при линейной рекомбинации (освещенный контакт – $S_1 = 10^3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, неосвещенный контакт – $S_2 = 1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, $\tau = 10^{-3} \text{ с}$, $g = 10^{15} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$): направление напряженности электрического поля для а) от освещенного контакта; б) к освещенному контакту.

Анализ полученных результатов показывает, что выпрямляющие свойства проявляются наиболее ярко, если освещенный контакт обладает малой скоростью поверхностной рекомбинации, а тыловой, соответственно, большой.

Аналогичные результаты вольтамперных характеристик представлены на рисунках 3-4 при квадратичном законе рекомбинации. Как и при линейной рекомбинации, выпрямление наиболее эффективно, если тыловой контакт обладает большой скоростью поверхностной рекомбинации, а освещенный – малой. На обратной ветви ВАХ наблюдается N -образный участок.

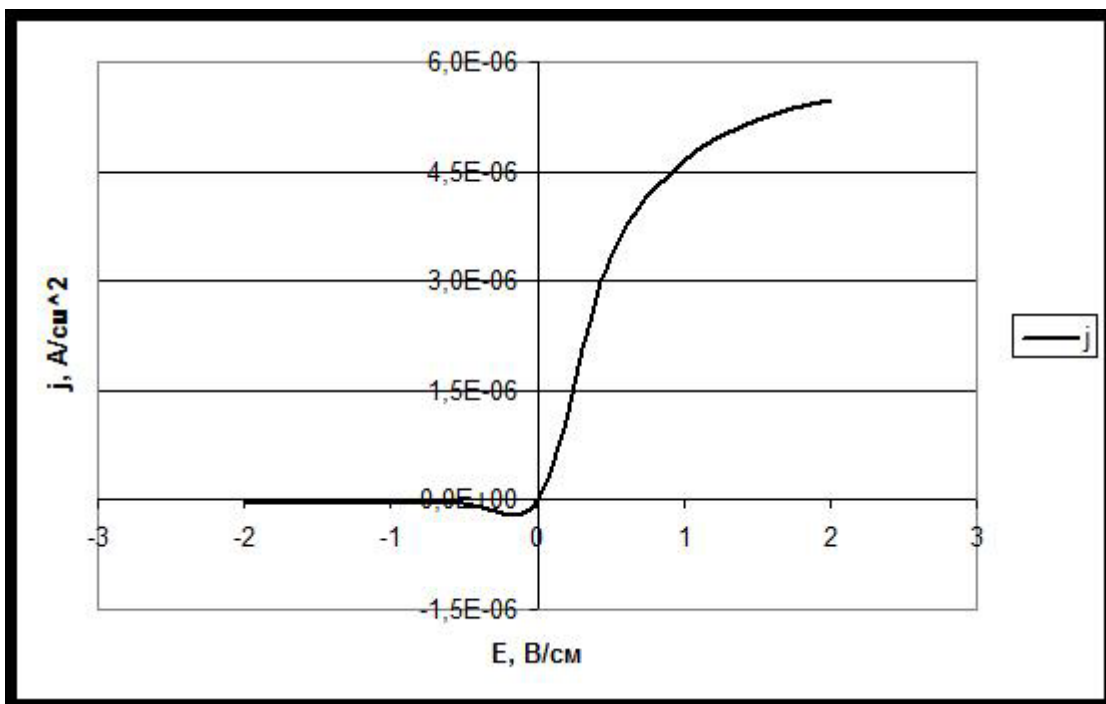


а)

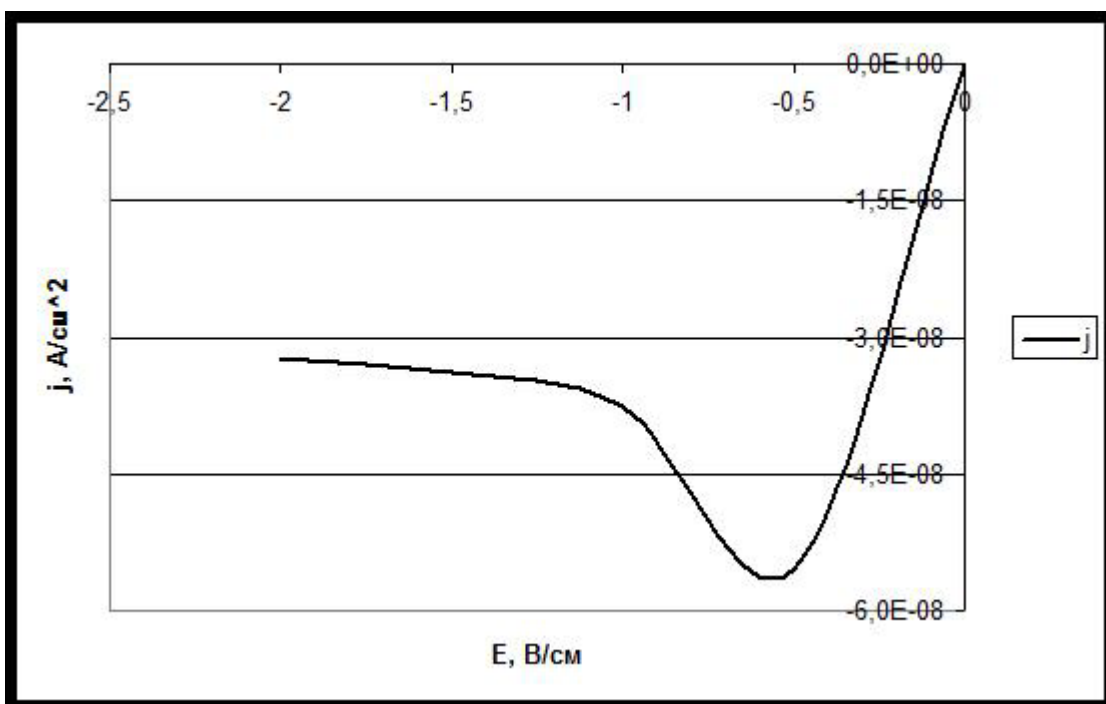


б)

Рис. 3 Зависимости плотности тока от напряженности электрического поля в полупроводнике при квадратичном законе рекомбинации (освещенный контакт – $S_1 = 1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, неосвещенный контакт – $S_2 = 10^3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, $\tau = 10^{-3} \text{ с}$, $g = 10^{15} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$): направление напряженности электрического поля для а) от освещенного контакта; б) к освещенному контакту.



a)



b)

Рис. 4 Зависимости плотности тока от напряженности электрического поля в полупроводнике при квадратичном законе рекомбинации (освещенный контакт - $S_1 = 10^3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, неосвещенный контакт - $S_2 = 1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, $\tau = 10^{-3} \text{ с}$, $g = 10^{15} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$): направление

напряженности электрического поля для а) от освещенного контакта; б) к освещенному контакту.

Нами были рассчитаны средние по модулю токи (СМТ), определяющие выделяющуюся в полупроводнике мощность, и средние токи (СТ) через полупроводник, определяющие выпрямляющие свойства. Расчет проведен для случая, когда к полупроводнику прикладывалось переменное напряжение, изменяющееся по гармоническому закону и генерация носителей светом неоднородная ($g = g_0 \exp(-\alpha x)$).

$$j = \frac{1}{T} \int_0^T |j(t)| dt \quad j_1 = \frac{1}{T} \int_0^T j(t) dt \quad (3)$$

Освещается контакт 1, рекомбинация на котором равна S_1 . При одинаковых рекомбинационных свойствах контактов $S_1 = S_2$ выпрямляющие свойства полупроводниковой структуры проявляются слабо и связаны с неоднородным поглощением света, а, следовательно, с неоднородной генерацией неравновесных носителей. Плотность тока для таких структур пропорциональна напряженности электрического поля ($j \sim E, j_1 \sim E$). Выпрямляющие свойства проявляются слабо и в случае, когда освещенный контакт имеет существенно большую скорость поверхностной рекомбинации, чем неосвещенный. При наличии асимметрии в поверхностных свойствах контактов зависимости плотности тока от напряженности становятся нелинейными.

Если освещенный контакт имеет существенно меньшую скорость поверхностной рекомбинации, чем неосвещенный, то полупроводник является хорошим выпрямителем. Механизм выпрямления связан с выносом электронов электрическим полем из области их высокой концентрации в область низких концентраций (из освещенной области в тыловой контакт) в случае, когда напряженность электрического поля противоположна направлению падения луча света. При этом общее сопротивление уменьшается. При изменении направления напряженности электрического поля происходит вынос носителей заряда от тылового контакта. Вблизи него создается большой градиент концентрации основных носителей заряда. Это приводит к увеличению диффузии к контакту с большой скоростью поверхностной рекомбинации, что, в свою очередь, способствует увеличению запирающего слоя вблизи тылового контакта. Тыловой контакт играет роль $p-n$ перехода полупроводникового диода. В отличие от диода изготовление изучаемой структуры не требует высоких технологий.

Анализ зависимости j и j_1 от S_2 (рис. 5) показывает, что с увеличением скорости поверхностной рекомбинации на тыловом контакте увеличиваются выпрямляющие свойства структуры. С увеличением скорости поверхностной рекомбинации S_2 выпрямленный ток увеличивается. Затем на кривой $j = j(S_2)$ наблюдается максимум ($S_2 = 80 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$), после чего величина выпрямленного тока уменьшается с увеличением S_2 . Увеличение S_2 с одной стороны приводит к увеличению выпрямляющих свойств (рис. 5), с другой уменьшается чувствительность полупроводника к свету (то есть j и j_1 уменьшаются). Последнее очевидно, так как увеличение S_2 приводит к обеднению свободными носителями заряда всей толщины полупроводника. Способствует этому диффузия и дрейф электронов в электрическом поле.

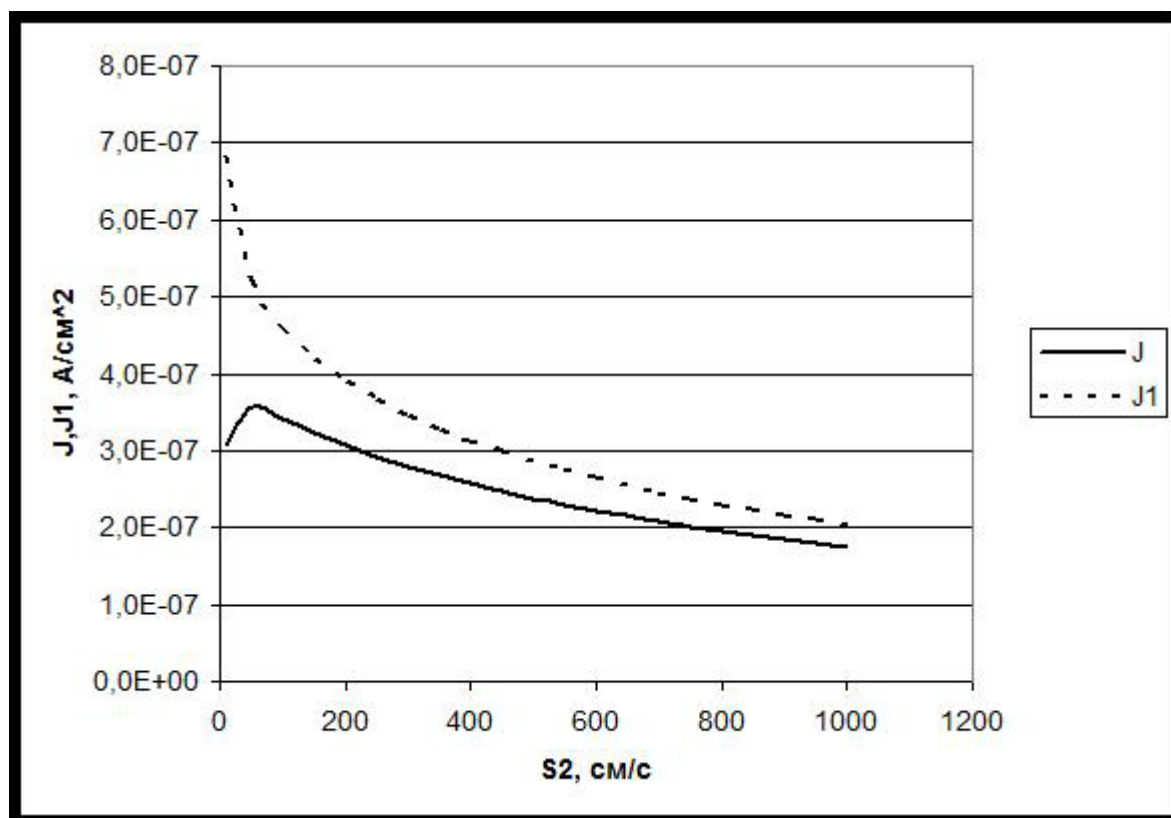


Рис. 5 Зависимости плотности тока от скорости поверхностной рекомбинации неосвещенного контакта: освещенный контакт – $S_1 = 1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, $\tau = 10^{-3} \text{ с}$, $g = 10^{15} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, $E = 1 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$, $v = 400 \text{ Гц}$

Следует ожидать, что выпрямляющие свойства структур будут проявляться в определенной области частот. При относительно больших частотах свободные носители заряда будут совершать колебания относительно положения равновесия, практически не перемещаясь к активным (рекомбинирующим) поверхностям. Увеличения области частот, для которых наблюдается значительная составляющая постоянного тока, можно достичь уменьшением толщины полупроводника.

Таким образом, поверхностная рекомбинация уменьшает концентрацию носителей заряда у контактов [5]. Если поле «оттягивает» носители заряда от контакта, образуется слой с повышенным сопротивлением. Величина тока уменьшается. При обратном направлении электрического поля носители дрейфуют к рекомбинационной поверхности. При их рекомбинации за счёт дальнейшего дрейфа уменьшается концентрация носителей по глубине полупроводника. Происходит обеднение носителей заряда по всей глубине полупроводника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милнс А., *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках*, Мир, М., 1977, 568 с.
2. Савченко А.В., Горбань А.П., Костылев В.П., Соколовский И.О., «Квадратичная рекомбинация в кремнии и ее влияние на объемное время жизни», *ФТП*, **41:3** (2007), 290–294.

3. Бородовский П. А., Булдыгин А. Ф., Голод С. В., “Аномальная релаксация фотопроводимости в кремнии при высоких уровнях инжекции”, *ФТП*, **43**:3 (2009), 329–331.
4. Горюнов В. А., Гришаев В. Я., Никишин Е. В., “Об изменении времен жизни носителей заряда при импульсном фотовозбуждении в кремнии с глубокими примесными центрами”, *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*, 2011, № 4, 118–126.
5. Блекмор Д., *Статистика электронов в полупроводниках*, Мир, М., 1964, 392 с.
6. Смит Р.; под ред. Пенина Н. А., *Полупроводники: пер. с англ.*, Мир, М., 1982, 560 с.
7. Георгобиани А. Н., “Широкозонные полупроводники $A^{II}B^{VI}$ и перспективы их применения”, *Успехи физических наук*, **133**:1 (1974), 129–155.
8. Вавилов В. С., “Особенности физики широкозонных полупроводников и их практических применений”, *Успехи физических наук*, **164**:3 (1994), 503–525.

The kinetics of photoconductivity under interband excitation with surface recombination

© S. M. Muryumin⁴, A. E. Nikishina⁵, E. V. Nikishin⁶

Abstract. We investigated the kinetics of photoresistor photoconductivity with deep foreign centers theoretically. Typical parameters of semiconductors A^2B^6 and A^3B^5 were used. We considered the influence of electric field and electrons and holes border diffusion to photosensitivity of photoresistor.

Key Words: the kinetics of photoconductivity, recombination centers, lifetime of electrons and holes, A^2B^6 and A^3B^5 , surface recombination.

⁴ Associate professor of Applied Mathematics Chair, Mordovian State University after N.P. Ogarev, Saransk

⁵ Graduate student of Applied Mathematics Chair, Mordovian State University after N.P. Ogarev, Saransk; annikishina@yandex.ru

⁶ Associate professor of Experimental Physics Chair, Mordovian State University after N.P. Ogarev, Saransk; nikishin57@mail.ru