

Исследование влияния ловушек носителей заряда на линейность ПЗС-фотоприемника

© В.В. Сидоров^{1,2}, П.В. Петров²

¹ АО Радиевый институт им. В.Г. Хлопина,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: pavel.petrov@gmail.com

Поступила в Редакцию 7 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 22 ноября 2024 г.

Принята к публикации 22 ноября 2024 г.

Исследуются свойства кремниевого прибора с зарядовой связью фотоприемника методом синхронного детектирования. При малых интенсивностях освещенности обнаружена нелинейность характеристики фотоприемника, обусловленная наличием ловушек в зоне накопления заряда. Построена теоретическая модель, позволяющая описать экспериментальные результаты, а также вычислить концентрацию и энергию ловушек. Продемонстрировано, что, используя энергию и концентрацию ловушек в роли калибровочных коэффициентов, можно линеаризовать результаты измерений прибора с зарядовой связью фотоприемника.

Ключевые слова: ПЗС-фотоприемник, ловушки носителей заряда, уравнение электронейтральности, синхронное детектирование.

DOI: 10.61011/FTP.2024.11.59488.7299

1. Введение

Приборы с зарядовой связью (ПЗС), такие как ПЗС-матрицы и линейки, широко используются в качестве фотодетекторов в современных лабораториях. Основным их достоинством являются высокий квантовый выход, а также возможность одновременной многоканальной регистрации сигналов с отдельных участков матрицы — так называемых пикселей. Вместе с тем ПЗС-приемникам присущи и определенные недостатки. Одним из таких недостатков, препятствующим работе со слабыми сигналами, является наличие шума $1/f$, присущего многим полупроводниковым приборам. Обычный метод улучшения соотношения сигнал-шум заключается в накоплении множества кадров с фотоприемника, с их последующим усреднением. Присутствие шума $1/f$ в сигнале фотоприемника приводит к тому, что после накопления некоторого числа кадров дальнейшее усреднение не приводит к улучшению соотношения сигнал-шум. Это резко ограничивает возможность работы ПЗС-фотоприемников со слабыми сигналами, измерение которых необходимо, например, при спектральных исследованиях одиночных квантовых объектов, таких как локализованные экситоны [1,2]. Кроме шумов, еще одной характерной проблемой ПЗС-фотоприемников при работе со слабыми сигналами являются ненулевые темновые токи, учет которых представляет собой отдельную сложную задачу [3].

Традиционным способом борьбы с указанными проблемами в измерениях является техника синхронного детектирования. Широко применяемая в работе с одноканальными фотоприемниками, она однако не получила

распространения в работе с ПЗС-фотоприемниками из-за возникающих трудностей при демодуляции большого числа данных с множества пикселей. В настоящей работе эта техническая трудность была нами преодолена путем создания высокопроизводительного программного обеспечения, осуществляющего в реальном времени демодуляцию сигнала с 2048 пикселей ПЗС-фотоприемника. Измерения с использованием техники синхронного детектирования позволили провести измерения сигнала ПЗС-фотоприемника в режиме слабых интенсивностей освещенности. Исследование зависимости сигнала от интенсивности накачки выявило наличие нелинейного участка в режиме слабых интенсивностей, связанного с наличием ловушек в области накопления заряда. Сопоставление результатов измерений с теоретической моделью, построенной в результате решения уравнения электронейтральности, позволило оценить количество и энергию связи ловушек для каждого пикселя. Использование этих данных в качестве калибровочных коэффициентов позволило попиксельно линеаризовать характеристику ПЗС-фотоприемника.

2. Экспериментальная установка

В работе исследовались характеристики коммерчески распространяемой ПЗС-камеры Thorlabs LC100, сконструированной на основе ПЗС-чипа Sony ILX554B. Этот прибор представляет собой линейный массив из 2048 пикселей размером 56×14 микрон. По сравнению с другими, используемыми в оптической спектроскопии приборами, камера Thorlabs LC100 имеет сравнительно высокую скорость регистрации, достигающую

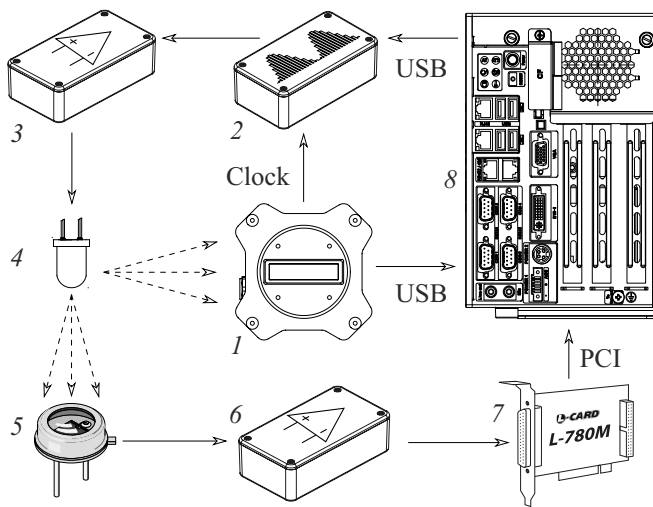


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — ПЗС-камера Thorlabs LC100, 2 — модулятор, 3 — драйвер светодиода, 4 — светодиод, 5 — фотодиод, 6 — усилитель сигнала фотодиода, 7 — АЦП, 8 — компьютер.

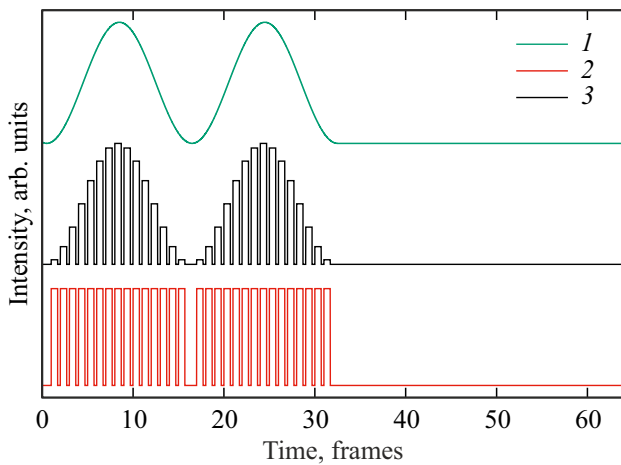


Рис. 2. Зависимости сигналов аналоговой (1), цифровой (2) и аналого-цифровой (3) модуляции от времени. Показаны два периода модуляции с последующим нулевым участком, необходимым для измерения темнового сигнала.

900 кадров в секунду. Это свойство делает ее удобной для работы с модулированными сигналами.

На рис. 1 приведена схема измерительной установки. Для освещения камеры использовался светодиод, интенсивность излучения которого модулировалась так называемой аналого-цифровой модуляцией. Амплитуда излучения представляла собой последовательность прямоугольных импульсов, амплитуда которых модулировалась синусоидально. В момент импульса происходит накопление заряда в фотоприемнике, в то время как в промежутке между импульсами производится считывание результата. Такая модуляция необходима по той причине, что ПЗС-чип Sony ILX554B не имеет затвора

и чтение должно происходить в темноте. Длительность одного импульса составляла 1.054 мс. Временные зависимости сигналов аналоговой, цифровой и аналого-цифровой модуляций приведены на рис. 2. Так как источником сигнала синхронизации являлась ПЗС-камера Thorlabs LC100, непосредственная передача фазы модуляции была технически неосуществима. Поэтому измеренный сигнал с каждого пикселя ПЗС-фотоприемника обрабатывался посредством так называемой квадратурной демодуляции, которая позволяет получить амплитуду измеренного сигнала S по следующим формулам:

$$A = \frac{2}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} S_{(M \cdot i + j)} \sin 2\pi \frac{j}{M},$$

$$B = \frac{2}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} S_{(M \cdot i + j)} \cos 2\pi \frac{j}{M},$$

$$S = \sqrt{A^2 + B^2}.$$

Здесь M — количество кадров на период модуляции, N — число периодов в серии измерений, S_i — сигнал i -го измерения. При обработке по такой методике результат будет складываться из сигнала на частоте модуляции и фурье-компоненты шума регистрирующей системы на этой же частоте. Для того чтобы вычистить шумовую составляющую, производилось измерение темнового сигнала (рис. 2), который также демодулировался и после этого вычитался из сигнала освещенного фотоприемника.

Независимо от ПЗС-фотоприемника интенсивность излучения контролировалась кремниевым фотодиодом BPW20RF, сигнал с которого усиливался операционным усилителем LTC2057HV с низким уровнем шума и нулевым дрейфом. Усиленный сигнал регистрировался АЦП Lcard L-780M, результаты измерений демодулировались по такой же схеме, как и сигнал с ПЗС-камеры. Для накачки использовались светодиоды синего, красного и зеленого цветов. Какой-либо качественной разницы для освещения с разной длиной волны не было обнаружено, в тексте приведены результаты, полученные при освещении синим светодиодом.

3. Характеристика передачи фотонов

Для точной калибровки показаний ПЗС-фотоприемника нами были проведены измерения так называемой „характеристики передачи фотонов“ (в международной литературе — „photon transfer curve“). Эта методика заключается в измерении зависимости дисперсии сигнала от среднего сигнала фотоприемника. Как правило, на этой зависимости присутствует линейный участок. Наличие такого участка означает то, что фотоприемник при таких интенсивностях сигнала линейен, а шум носит характер дробового. Действительно, в режиме

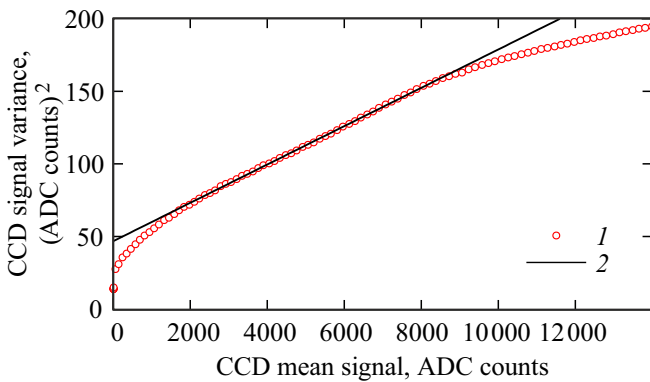


Рис. 3. Характеристика передачи фотонов: 1 — результат измерений, 2 — подгонка линейного участка методом наименьших квадратов.

дробового шума средний сигнал зависит от числа фотонов прямо пропорционально N , а среднеквадратичное отклонение — как \sqrt{N} . Тогда средний квадрат также пропорционален N . Обратный коэффициент наклона этой прямой есть просто количество фотовозбужденных электронов в штуках e^- на один отсчет АЦП [4]. Измерения характеристики переноса фотонов производились по обычной для таких измерений схеме [5]. ПЗС-фотоприемник равномерно освещался светом светодиода. При заданной интенсивности освещенности ПЗС-матрицы производился последовательный съем серии из N кадров. Для каждого i -го пикселя производилось вычисление среднего сигнала \bar{S}_i и его дисперсии σ_i^2 :

$$\bar{S}_i = \frac{1}{N} \sum_1^N S_i; \quad \sigma_i^2 = \overline{S_i^2} - \bar{S}_i^2.$$

Полученные значения \bar{S}_i и σ_i^2 усреднялись по всем пикселям.

Измеренная характеристика переноса фотонов, представленная на рис. 3, состоит из трех участков. В диапазоне от 2000 до 8000 отсчетов АЦП характеристика линейна, что свидетельствует о линейности фотоприемника в этом диапазоне. Из наклона прямой был определен коэффициент передачи фотонов, который для исследуемого фотоприемника составил оказался равен $K = 75.7 e^- / (\text{ADC count})$ фотоэлектронов на один отсчет аналого-цифрового преобразователя (АЦП). На высоких и низких сигналах наблюдаются отклонения характеристики от линейности. Нелинейность на высоких сигналах обычно связана с переполнением потенциальной ямы для электронов при накоплении заряда и, таким образом, свойственна всем ПЗС-фотоприемникам. Обычно она не создает проблем при измерениях, так как слишком сильный сигнал несложно ослабить светофильтром. В настоящей работе мы будем исследовать нелинейность, проявляющуюся в режиме слабой освещенности.

4. Результаты измерений линейности ПЗС-фотоприемника

На рис. 4 представлены результаты измерений зависимости сигнала ПЗС-фотоприемника от интенсивности освещенности, снятые в режиме синхронного детектирования. Видно, что при малой освещенности сигнал растет нелинейно, тогда как при большой освещенности он выходит на линейную зависимость, проходящую через точку чуть ниже начала координат. Для наглядности представлены результаты измерений только с трех

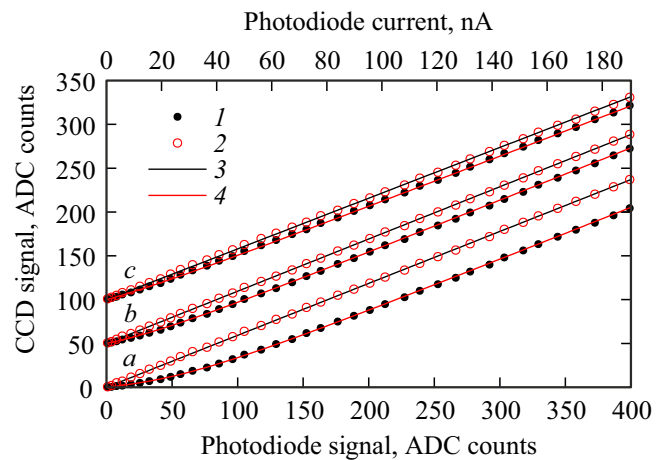


Рис. 4. Зависимости сигнала ПЗС-фотоприемника от интенсивности освещения для трех пикселей: с большой (а), промежуточной (b) и малой (c) степенью нелинейности, сдвинутые по оси ординат для наглядности. На рисунке приведены: 1 — измеренная зависимость сигнала ПЗС-фотоприемника от тока светодиода, 2 — пересчитанный по ф. (4) линейризованный сигнал ПЗС-фотоприемника, 3 — результат подгонки методом наименьших квадратов по формуле $y = ax$, 4 — подгонка результатов измерений по ф. (2).

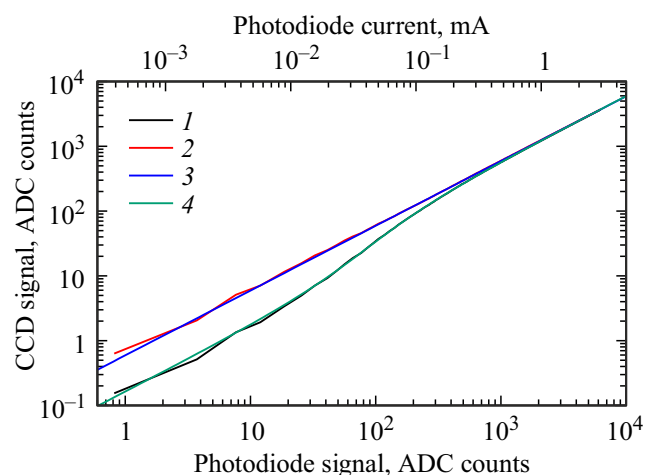


Рис. 5. Зависимости сигнала ПЗС-фотоприемника от интенсивности освещения в двойном логарифмическом масштабе для пикселя с большой степенью нелинейности. Обозначения те же, что и на рис. 4.

пикселей: с малой, промежуточной и большой степенью нелинейности. Наиболее естественным объяснением нелинейного характера зависимости является наличие ловушек в области накопления заряда. Часть фотовозбужденных электронов локализуется на ловушках и не дает вклада в измеряемый сигнал. При возрастании накачки, по мере того как количество фотовозбужденных электронов становится намного больше, нежели число ловушек, зависимость сигнала от накачки становится линейной. Для того чтобы продемонстрировать поведение фотоприемника при больших освещенностях на рис. 5 представлены результаты измерений, построенные в двойном логарифмическом масштабе. Хорошо виден переход к линейной зависимости при сигналах порядка 1000 разрядов АЦП, что согласуется с результатами измерений характеристики передачи фотонов (рис. 3).

5. Теоретическая модель

Для проверки предложенной гипотезы о влиянии ловушек на линейность фотоприемника нами была рассмотрена теоретическая модель на основе уравнения электронейтральности [6]. Предполагая, что энергетический уровень ловушек отстоит от края зоны проводимости на энергию E_t много больше kT , будем использовать приближение статистики Больцмана. Считая область накопления заряда нелегированной, в уравнение электронейтральности необходимо включить только концентрацию фотовозбужденных дырок Δp , равную полной концентрации фотовозбужденных электронов Δn , концентрацию фотовозбужденных электронов, находящихся в зоне проводимости и дающих вклад в сигнал $n = N_a \exp(E_f/kT)$, а также слагаемое для электронов, локализованных на ловушках, которые мы предполагаем нейтральными. Пренебрегая наличием фоновых доноров и акцепторов, уравнение электронейтральности можно записать в следующем виде:

$$N_c A + \frac{N_t}{A^{-1} \exp(-E_t/kT) + 1} = \Delta p; \quad A = \exp \frac{E_f}{kT}. \quad (1)$$

Здесь E_f — квазиуровень Ферми для электронов, N_t — концентрация ловушек, $N_c = 2.86 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ — эффективная плотность состояний в кремнии при комнатной температуре [7]. Строго говоря, слагаемое, соответствующее концентрации электронов на ловушках, должно содержать в знаменателе предэкспоненциальный множитель, зависящий от кратности вырождения состояния. Поскольку для глубоких ловушек в кремнии этот параметр, как правило, неизвестен, для простоты предполагается, что этот множитель равен 1. Уравнение (1) представляет собой квадратное уравнение относительно коэффициента A и может быть легко решено. Тогда концентрация зарядов в зоне проводимости может быть записана как $n = N_c A$:

$$n = \frac{1}{2} (\Delta p - a + \sqrt{(\Delta p - a)^2 + b \Delta p}), \quad (2)$$

где для удобства введены обозначения

$$a = N_t + N_c \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right);$$

$$b = 4N_c \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right). \quad (3)$$

Знак плюс перед квадратным корнем в выражении (2) выбран из тех физических соображений, что в пределе больших оптических накачек большинство ловушек должно оказаться заполненным и тогда концентрация свободных электронов будет равна $n = \Delta p - N_t$. В том, что это справедливо, легко убедиться, разложив слагаемое, содержащее квадратный корень в степенной ряд в пределе больших Δp . На рис. 3 приведен результат подгонки экспериментальной кривой уравнением (2) с использованием коэффициентов a и b в качестве подгоночных параметров. Подгонка осуществлялась при помощи алгоритма оптимизации Нелдера-Мида [8]. Использование коэффициентов a и b в качестве калибровочных коэффициентов позволило произвести попиксельную линеаризацию измерений ПЗС-фотоприемника по формуле

$$\Delta n = \Delta p = \frac{4n(n+a)}{4n+b}. \quad (4)$$

Формулу (4) легко получить, выразив Δp из формулы (2). Результат линеаризации по формуле (4) приведен на рис. 4 и 5. Видно, что использование разработанной методики позволяет обеспечить линейность фотоприемника для динамического диапазона $\sim 10^4$. Используя (3), несложно получить формулы для поверхностной концентрации ловушек N_t , а также для средней энергии локализации ловушек E_t :

$$N_t = K \frac{a - b/4}{14\mu \times 56\mu}, \quad (5)$$

$$E_t = kT \ln\left(N_c^{-2/3} \frac{Kb}{14\mu \times 56\mu}\right). \quad (6)$$

Для удобства вычислений параметры a , b , n , Δn и Δp измерялись в разрядах АЦП ПЗС-фотоприемника. Поэтому для перехода к поверхностным концентрациям их нужно домножить на K и разделить на площадь пикселя. По формулам (5)–(6) были оценены значения поверхностной концентрации и энергии локализации ловушек в каждом пикселе фотоприемника, приведенные на рис. 6. Средняя поверхностная концентрация ловушек сравнительно невелика и составляет $1.7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, что свидетельствует о хорошем качестве фотоприемника. Энергетический уровень ловушек равен ~ 0.3 эВ. В научной литературе неоднократно встречаются работы, в которых в структурах на основе кремния наблюдались ловушки со схожей энергией локализации [9–12]. По наиболее распространенной интерпретации, они не связаны с наличием какой-либо конкретной примеси, а соответствуют либо вакансионным комплексам, либо дефектам замещения.

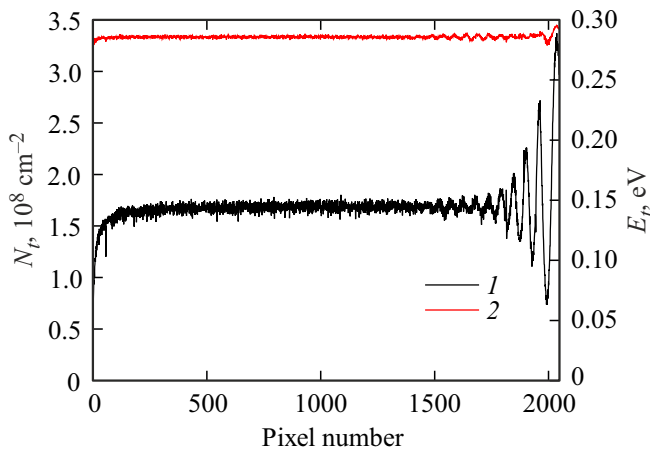


Рис. 6. Зависимости поверхностной концентрации N_s (1) и энергии ловушек E_t (2) от номера пикселя фотоприемника.

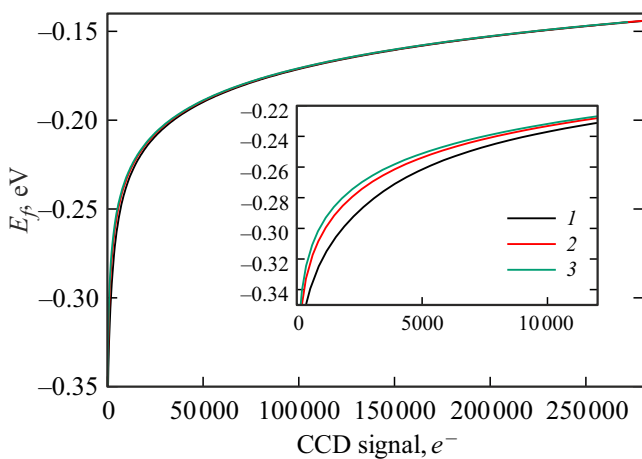


Рис. 7. Зависимость положения квазиуровня Ферми E_f от количества фотовозбужденных электронов Δn для трех пикселей: с большой (1), промежуточной (2) и малой (3) концентрацией ловушек. На вставке — участок с малой освещенностью в увеличенном масштабе.

Необычно выглядят осцилляции поверхностной концентрации ловушек, наблюдающиеся с одной стороны ПЗС-матрицы. Казалось бы, концентрация ловушек не должна значительно меняться вдоль поверхности образца, и уж тем более осциллировать. Однако наличие осцилляций несложно объяснить влиянием крупномасштабных флуктуаций электростатического потенциала, возникающих из-за работы электроники фотоприемника. Энергетические уровни ловушек, связанных с дефектами, как правило, имеют некоторую конечную ширину. В отсутствие освещения уровень Ферми должен находиться где-то внутри уширенного уровня ловушек, частично заполненных электронами. В том случае, если на каком-то участке ПЗС-матрицы электростатический потенциал сдвинет уровень ловушек вниз относительно уровня Ферми, доля ловушек, заполненных электрона-

ми, увеличится, что проявится как локальное снижение концентрации пустых ловушек. И наоборот, повышение потенциала приведет к тому, что пустых ловушек локально станет больше.

Для проверки этого предположения по формуле (7) были построены зависимости положения электронного квазиуровня Ферми от n для трех пикселей: с большой, промежуточной и малой наблюдаемой концентрацией ловушек (рис. 7):

$$E_f = kT \ln \left(N_c^{-2/3} \frac{Kn}{14\mu \times 56\mu} \right). \quad (7)$$

При высоких уровнях освещенности положения квазиуровня Ферми для всех трех пикселей хорошо совпадают и примерно равны — $E_t/2$. Это соответствует ситуации, когда все ловушки заполнены и поведение пикселей одинаково. При малых уровнях освещенности квазиуровень Ферми для пикселей с большой концентрацией ловушек расположен ниже на энергию ~ 10 мэВ. Примерно на такую же энергию отличаются и средние значения E_t в пикселях с большой и с малой концентрацией ловушек, что подтверждает наше предположение.

6. Заключение

В работе методом синхронного детектирования исследованы свойства фотоприемника на основе ПЗС-матрицы. Обнаруженная нелинейность световой характеристики при малых интенсивностях освещенности объяснена наличием ловушек в области накопления заряда. Построенная теоретическая модель позволила оценить количество и энергию локализации ловушек, а также линеаризовать результаты измерений.

Финансирование работы

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 23-22-00333.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.S. Gritchenko, I.Y. Eremchev, A.V. Naumov, P.N. Melentiev, V.I. Balykin. *Opt. Laser Techn.*, **143**, 107301 (2021).
- [2] P.V. Petrov, I.A. Kokurin, G.V. Klimko, S.V. Ivanov, Yu.L. Ivanov, P.M. Koenraad, A.Yu. Silov, N.S. Averkiev. *Phys. Rev. B*, **94**, 115307 (2016).
- [3] А.В. Захаров, М.Е. Прохоров, М.С. Тучин, А.В. Евенко, А.О. Жуков, А.И. Гладышев, Н.И. Шахов, Ю.Г. Харламов, Н.А. Жукова. *Оборонный комплекс — науч.-техн. прогрессу России*, вып. 1, 43 (2019).
- [4] J.R. Janesick. *Photon Transfer* (SPIE Press Monograph, 2007) v. PM 170.

- [5] S.E. Bohndiek, A. Blue, A.T. Clark, M.L. Prydderch, R. Turchetta, G.J. Royle, R.D. Speller. *IEEE Sensors J.*, **8** (10), 1734 (2008).
- [6] А.И. Ансельм. *Введение в теорию полупроводников* (М., Наука, 1978).
- [7] M.A. Green. *J. Appl. Phys.*, **67** (6), 2944 (1990).
- [8] P.K. Mogensen, A.N. Riseth. *J. Open Source Software*, **3** (24), 615 (2018).
- [9] E.V. Astrova, V.B. Voronkov, V.A. Kozlov, A.A. Lebedev. *Semicond. Sci. Technol.*, **13** (5), 488 (1998).
- [10] P. Lévêque, P. Pellegrino, A. Hallén, B. Svensson, V. Privitera. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **174** (3), 297 (2001).
- [11] И.Е. Тыщенко, В.П. Попов, П.А. Дементьев. *ФТП*, **45** (3), 335 (2011).
- [12] Е.В. Иванова, М.В. Заморянская. *ФТТ*, **61** (8), 1448 (2019).

Редактор Г.А. Оганесян

Study of the influence of charge carrier traps on the linearity of a CCD photodetector

V.V. Sidorov^{1,2}, P.V. Petrov²

¹ JSC V.G. Khlopin Radium Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract We study the properties of a silicon charge coupled device photodetector using the lock-in technique. At low illumination intensities, nonlinearity of the photodetector characteristics is detected due to the presence of traps in the charge accumulation zone. A theoretical model is developed that allows one to describe the experimental results and calculate the concentration and energy of the traps. It is demonstrated that using the energy and concentration of the traps as calibration coefficients, it is possible to linearize the results of charge coupled devices photodetector measurements.